

海洋酸化常见问题及解答

前言

海洋酸化是一个新的研究领域，该领域的大部分研究结果都是在近十年才发表出来的。因此，在这个领域有部分结果是确定的，但是还有很多需要解决的问题。海洋酸化也是个多学科交叉的领域，其研究内容包括化学、古生物学、生物学、生态学、生物地球化学、模式和社会科学等。而且，海洋酸化的一些研究领域，例如碳酸盐系统化学，是错综复杂的。正因为这些原因，媒体和公众发现该领域的一些科学问题或结果很令人费解。

美国海洋碳和生物地球化学（Ocean Carbon and Biogeochemistry, OCB, www.us-ocb.org）项目在欧洲海洋酸化计划（European Project on Ocean Acidification, EPOCA, <http://www.epoca-project.eu/>）和英国海洋酸化研究计划（UK Ocean Acidification Research Program, <http://www.nerc.ac.uk/research/programmes/oceanacidification/>）的支持和帮助下整理了一些海洋酸化领域经常问到的问题（FAQs）。这些问题被广泛地发布到海洋酸化研究领域，要求在综合目前认识的基础上起草准确的答案，而且力争通俗易懂。然后这些答案通过公开评阅和修正，确保在不失科学性的前提下保证可读性。领域内的响应非常热情，有来自 5 个国家，19 个研究所的 27 名科学家参与了这个过程。

我们真心希望这个常见问题列表是有用的。这个列表本身也是一个正在进行的过程，我们邀请每个人都去寻找更准确的答案或发送评论，并把您的建议或评论发给 Sarah Cooley (scooley@whoi.edu)，我们会根据大家的反馈来定期修正这个问题列表。

Joan Kleypas and Richard Feely (OCB), Jean-Pierre Gattuso (EPOCA), and Carol Turley (UK Ocean Acidification Research Programme)

“海洋酸化”的名称

海洋不是酸性的，而且模式的结果也表明海洋不会变成酸性的。那么我们为什么称它为“海洋酸化”呢？

海洋酸化指的是海水溶解更多的大气 CO₂ 而导致的海水 pH 值降低的过程（也就是氢离子浓度升高的过程）。“酸化”一词指的是在 pH 标度上从起点到终点的 pH 值降低过程。这个术语在很多其他领域（包括医药和食品科学）是指向溶液中加入酸，而不管溶液的 pH 值如何。例如，尽管海水的 pH 值高于 7.0（因此在 pH 标度上是碱性的），但是大气 CO₂ 浓度升高仍然会导致海水的酸性上升和 pH 值降低。这与我们谈论温度时的用法是类似的。如果气温从 -40 °C 升高到 -29 °C（从 -40 °F 升高到 -20 °F），尽管仍然是很冷的，但我们称它为“变暖”。

— James Orr, 资深科学家, 法国气候科学与环境科学实验室; Christopher L. Sabine, 海洋学家; 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL); Robert Key, 海洋学家, 美国普林斯顿大学。

海洋吸收目前全世界储存的所有化石燃料燃烧所释放的 CO₂ 会变成酸性的吗？

答案是否定的。包括海底存在的碳酸钙矿物慢慢溶解中和部分 CO₂ 在内的海洋碳系统的基本化学原理，可以防止海洋在全球尺度上变成酸性的。

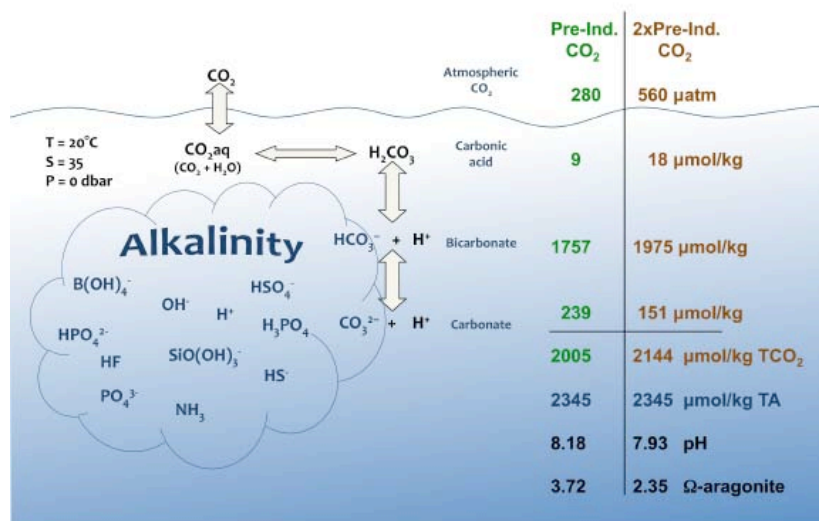
— Christopher L. Sabine, 海洋学家, 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL)。

海洋酸化是否只是气候变化的别名？

答案是否定的。尽管海洋酸化和气候变化有共同的起因（大气 CO₂ 浓度升高），但是气候变化包括与此相关的地球热收支变化（由于 CO₂ 和其他气候活性气体的“温室效应”）引起的效应。这些效应引起全球变暖和天气格局的变化，而海洋酸化专指由于海洋吸收人为活动释放到大气中的 CO₂ 而造成的海洋 pH 值降低。海洋酸化不包括海洋变暖。

— Christopher L. Sabine, 海洋学家, 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL)。

海洋碳化学和 pH 值



图注：（左图）海水中碳酸盐系统形态及形态间发生的一些平衡反应示意图。海水总碱度一般定义为海水中“过剩的碱”，或过剩的质子接受体的总和。总碱度的组成离子用淡蓝色表示。（右图）工业革命以前当大气 CO₂ 浓度为 280 ppm 时海水中碳酸盐系统各形态离子的浓度（绿色）及其两倍浓度（棕色）。总 CO₂（TCO₂）是碳酸、碳酸氢根和碳酸根离子浓度的总和。同时也列出了该条件下的 pH 值和雯石的饱和度（Ω-aragonite）。这些值是用“Mehrbach refit”碳酸盐系统常数(Dickson and Millero, 1987, Deep-Sea Research)和 Dickson(1990, Journal of Chemical Thermodynamics) 硫酸盐电离常数计算出来的，pH 值用总氢离子标度。

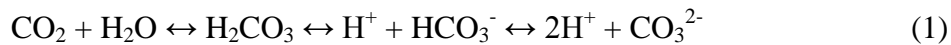
CO₂ 真的会使海洋 pH 值降低很多吗？

科学家估计，从工业革命至今，表层海洋的 pH 值已经降低了 0.1。因为 pH 值是氢离子浓度的量度，而且 pH 值是对数的，即 pH 值每下降 1 个单位，则氢离子浓度会上升 10 倍，因此 pH 降低 0.1 相当于海洋中氢离子的浓度上升 26%。如果继续按照目前这种化石燃料消耗量和大气 CO₂ 浓度升高的趋势发展，则到 21 世纪末 pH 值可能会下降 0.3-0.4，则海水氢离子浓度会比工业革命以前上升 100-150%。

— Scott Doney, 资深科学家, 美国 Woods Hole 海洋研究所。

从 CO_2 与水反应的方程式表观看起来该过程会产生更多的碳酸根，那么海洋酸化怎么能使海水中的碳酸根离子浓度降低呢？

这是一个很容易引起混淆的地方，因为描述海水碳酸盐系统的一步一步的平衡方程未抓住海水中动态的化学环境。 CO_2 、 H_2O 、碳酸（ H_2CO_3 ）、碳酸氢根（ HCO_3^- ）和碳酸根（ CO_3^{2-} ）之间发生几个化学反应。一个可能产生碳酸根离子并降低 pH 的反应是：



然而，在目前海水的 pH 值下，另一个消耗碳酸根离子但不改变 pH 值的反应也会发生：



第二个方程描述的反应在现代海洋环境中更有可能发生，但是第一个反应也会发生，所以总的变化是碳酸根离子浓度和 pH 值同时降低。

— Christopher L. Sabine, 海洋学家, 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL)。

海洋是很咸的，所以看起来海洋不可能酸化。 CO_2 怎样能超出所有盐份的影响呢？

在实验室实验中，当酸和碱发生中和反应时会生成盐和水。但是在海洋中，使海水有“咸味”的主要离子（例如钠、氯和镁等）是从岩石风化中来的。几千年来，这些离子的正电荷和负电荷是处于电量平衡的。几十年到几百年的短时间尺度上海水 pH 值的变化是受弱酸和弱碱控制的，例如碳酸氢根（ HCO_3^- ）和硼酸根。在这些弱酸和弱碱中，溶解态 CO_2 （即碳酸）、碳酸氢根和碳酸根对全球海洋 pH 值变化的影响最大，因为他们的浓度变化相对于海洋中其他离子的浓度变化是最快的。

— Christopher L. Sabine, 海洋学家, 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL)。

如果冰盖融化的淡水进入海洋，那是否会简单地稀释酸度？

冰盖溶化的淡水稀释海水中碳酸盐系统所有组分的浓度，也稀释总碱度和盐度（总碱度和盐度都影响 pH）。例如，1 升暴露在现在大气 CO_2 浓度 390 ppm

下“典型的”北冰洋海水（温度 5°C，盐度 35，总碱度 2244 $\mu\text{mol/kg}$ ）的 DIC 浓度为 2100 $\mu\text{mol/L}$ ，pH 值为 8.04（自此以下都用总氢离子标度）。向 1 kg 海水中加入 1 kg 淡水会把盐度、总碱度和碳含量稀释到原来的一半，而 pH 值则会升高到 8.21。然而，稀释后的海水与大气失去平衡（现在的 $p\text{CO}_2$ 是 151 ppm，而上面大气的 $p\text{CO}_2$ 是 390 ppm），它会从大气吸收 CO_2 直到海水的 $p\text{CO}_2$ 也达到 390 ppm，平衡后 pH 值会降到 7.83。

— *Richard A. Feely*, 资深科学家, 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL); *Joan Kleypas*, 科学家, 美国国家大气研究中心。

海洋温度升高不是会导致 CO_2 逸出，从而抵消海洋酸化效应吗？

表层海水的 CO_2 含量对大气 CO_2 浓度和温度变化都有响应。例如，如果保持海洋温度不变而使工业革命前的大气 CO_2 浓度增加一倍（从 280 ppm 增加到 560 ppm），则表层海水的总溶解无机碳浓度从 2002 $\mu\text{mol/kg}$ 升高到 2131 $\mu\text{mol/kg}$ （假设盐度 35，温度 15°C，总碱度 TA 2300 $\mu\text{mol/kg}$ ）。如果在此期间海洋的温度升高 2°C，则海洋会吸收比较少的 CO_2 （总溶解无机碳的变化是从 2002 $\mu\text{mol/kg}$ 升高到 2117 $\mu\text{mol/kg}$ ）。因此，温度升高 2°C 会使表层海水对碳的吸收量下降 10%。海洋变暖也会影响大洋环流，进而降低海洋从大气吸收 CO_2 的能力，但是“过剩”的 CO_2 仍然会留在大气中并继续促进海洋酸化。对 pH 而言，气候变暖对大气 CO_2 、 CO_2 溶解度和化学形态变化的净效应大体可以抵消。

— *Scott Doney*, 资深科学家, 美国 Woods Hole 海洋研究所。

测定和观测

pH 标度是 1909 年才引入的，那么我们怎么知道以前海洋的 pH 值呢？

在冰盖形成冰川的时候，空气泡被封锁在冰中。科学家测定了气泡中 CO_2 的浓度，并建立了过去大气 CO_2 浓度的记录。因为大部分区域表层海水的 CO_2 浓度与大气 CO_2 是接近平衡的，所以表层海水的 CO_2 浓度可以从气泡中的 CO_2 浓度计算出来，进而把表层海水的 pH 值计算出来。实际上，冰芯记录表明，在过去的 80 万年中大气 CO_2 浓度从来没有高于 280 ppm，在这种条件下工业革命以前表层海洋的 pH 值平均为 8.2。

— *Jelle Bijma*, 生物地球化学家, 德国 Alfred Wegener 极地与海洋研究所。

哪些证据表明海洋正在发生酸化，海洋酸化源于哪些人类活动？

在过去的二三十年中，科学家在太平洋和大西洋收集了海水 $p\text{CO}_2$ 和 pH 值的准连续的记录。夏威夷、百慕大和加那利（Canary）岛的时间序列观测结果表明，随着大气 CO_2 浓度的上升，海水 $p\text{CO}_2$ 的上升与 pH 的下降呈镜像关系。1991 年和 2006 年实施的北太平洋 CO_2 浓度的其他观测结果也表明，北太平洋 CO_2 浓度随大气 CO_2 浓度的升高而升高。

— *Carol Turley*, 资深科学家, 英国 Plymouth 海洋研究所; *Joan Kleypas*, 科学家, 美国国家大气研究中心。

我们怎么知道千万年以前海洋的 pH 值呢？

为估算有测量仪器之前的温度或 pH 值等物理和化学参数，科学家用所谓的“代理参数”去计算，即用与欲求参数有直接关系，而且可以测定的参数去计算。例如，除了碳酸钙中的钙、碳和氧元素，钙化生物在钙化时会把许多其他元素也结合到硬壳和骨架中。当分析这些被保存在沉积物中的生物硬组织时，其他元素可以提供该生物生活时代的环境信息。历史上的海洋 pH 值及其变化可以通过海洋碳酸钙中硼元素的浓度及其同位素比值（ $\delta^{10}\text{B}$ and $\delta^{11}\text{B}$ ）来计算。其他的地球化学证据和模式提供强有力的证据表明，几百万年中表层海洋的平均 pH 不低于 8.2。

— *Jelle Bijma*, 生物地球化学家, 德国 Alfred Wegener 极地与海洋研究所。

海洋酸化效应与其他人为活动有什么关系？

其他人为活动一定正在影响海水化学及海洋的酸-碱平衡，但是其程度可能与大气 CO_2 浓度升高引起的海洋酸化不同。包含化石燃料燃烧产生的硫酸和硝酸的酸雨进入边缘海。酸雨对表层海洋化学的影响是局部的，它对海洋的总效应仅相当于大气 CO_2 浓度升高所导致的酸化效应的百分之几。近岸水体还受过剩营养盐输入的影响，主要是来源于农业活动、肥料和生活污水中的氮。化学成分的变化引起浮游植物水华，当水华结束有机物迁出表层时，细菌的呼吸作用导致海水中氧的浓度下降而 CO_2 浓度上升，次表层海水的 pH 也随之下降。

海洋酸化与这些人为活动影响的一个主要区别是，海洋酸化的影响真的是全球性的，它的影响涉及从赤道到两极的所有海盆中对海水 pH 值敏感的生物和海

洋钙化生物。目前，海洋酸化的影响还仅限于上层海洋的 200-500 米，但是影响深度在逐年加深，而许多其他人类活动的影响在性质上只是局部的。

— *Scott Doney*, 资深科学家, 美国 Woods Hole 海洋研究所; *Chris Langdon*, 副教授, 美国 Miami 大学。

地质缓冲

如果冰川径流增加，而且岩石粉末被带到海洋中，则这个过程可以提供在一定程度上抵消海洋酸化的碱度吗？

陆地岩石风化的增强确实增加海水的碱度和抵制 pH 降低的能力，但是仅通过这个过程需要上万年的时间才能中和人类活动释放并进入海洋的所有 CO₂。因此，在对人类最重要的时间尺度上（几十至几百年），这个缓冲海洋酸化的过程太慢，不能显著减轻海洋酸化过程。

— *Richard A. Feely*, 资深科学家, 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL); *Jelle Bijma*, 生物地球化学家, 德国 Alfred Wegener 极地海洋研究所。

当海洋变得更酸时，水下更多的碳酸钙矿物会溶解，这个过程会抵消海洋酸化效应吗？

水柱和沉积物中的碳酸钙矿物溶解确实会增强海水的碱度，抵消部分 pH 降低和与海水酸化有关的碳酸根离子浓度降低效应。然而，与岩石风化作用相似，这个过程非常慢，需要成千上万年的时间才能中和人类活动所释放并进入海洋的全部 CO₂。在影响目前人类的几十至几百年的时间内，这个过程缓解 CO₂ 进入海洋的过程太慢，所以与海洋酸化有关的化学变化会持续几百年的时间。

— *Richard A. Feely*, 资深科学家, 美国海洋与大气局太平洋海洋环境实验室 (NOAA PMEL)。

海洋酸化与光合作用

光合作用随海洋 CO₂ 浓度的升高而增强，珊瑚中有光合作用藻类，所以珊瑚会不会受益于海洋 CO₂ 浓度升高呢？

部分藻类的光合作用会随本世纪末 CO₂ 浓度的升高（700-800 ppm）而增强，但不是全部藻类都这样。生活在珊瑚虫体内的单细胞藻类（虫黄藻，*zooxanthellae*）的光合作用并不随 CO₂ 浓度的升高而明显增强。通常，虫黄藻和珊瑚虫保持着一种微妙的平衡共生关系。在这种共生关系中，虫黄藻把光合作用产生的以碳为基础的营养物质提供给宿主珊瑚虫，作为珊瑚虫体和珊瑚钙化（骨架构造）的重要碳源。如果珊瑚细胞内藻类的数量增长太多，则从虫黄藻到珊瑚虫的营养传递就可能就会中断。因此即便在高 CO₂ 浓度下虫黄藻的光合作用有所增强，珊瑚也未必能从中受益。在大部分实验中，当 CO₂ 浓度升高时珊瑚的钙化速率会下降，因此非常明显，CO₂ 浓度升高正在使珊瑚构建骨骼的能力降低，而不是通过增强虫黄藻的光合作用来保护自己。

— *Chris Langdon*, 副教授, 美国 *Miami* 大学; *Anne Cohen*, 研究员, 美国 *Woods Hole* 海洋研究所。

如果光合作用随 CO₂ 浓度的升高而增强，则浮游植物和海藻不是会长得更好吗？

近海 CO₂ 喷口附近的生物群落中的某些微藻（*microalgae*）、海藻和海草在长期暴露于高 CO₂ 的环境中生长得非常好。然而，该项研究也表明，由于长期的海洋酸化效应，近海生态系统发生了退化。生物多样性受到威胁：在 pH 值降低过程中有些生物，例如珊瑚藻，逐渐消失了，他们被欣欣向荣的入侵藻类所取代。这引起了大家的注意，即海洋酸化使外来藻激增而破坏近海的生态系统。

— *Jason Hall-Spencer*, 讲师, 英国 *Plymouth* 大学。

海水中 CO₂ 升高促进光合藻类的生长，难道这不是好事吗？

在高 CO₂ 水平下，部分海洋浮游植物和植物类群的生长和光合作用会增强，但这不是普遍规律。对其他物种来说，高 CO₂ 和酸化会对它们的生理产生负面的影响或不产生影响。因此，部分浮游植物和植物会成为“胜利者”，而其他会成为“失败者”。这表明，未来海洋酸化环境不是使所有浮游植物都公正地受益，而是可能导致海洋浮游植物群落物种的大转变。到目前为止的有些实验表明，在未来酸化的海洋中新的优势物种可能不能维持目前这么高产的食物链来维持目前健康的海洋生态系统和渔业资源。

— David Hutchins, 海洋环境生态学教授, 美国南加利福尼亚大学。

海洋酸化与钙化

为什么向家庭水族馆增加 CO_2 对动物有益, 而向海洋增加 CO_2 却导致有害的海洋酸化呢?

总体来讲, 淡水鱼类和植物对低 pH 和大范围 pH 变化环境的忍耐性更强, 这是因为淡水的碱度低, 这就意味着淡水中的水化学不象海水那样能够减小 pH 值的变化 (即淡水的“缓冲能力”非常弱)。湖泊和河流中 pH 值的自然变化也比海洋中大得多。淡水生物在进化过程中形成了特殊的机制让它们在更酸的环境和 pH 值变化的环境中生存, 例如, 淡水植物可能受益于高 CO_2 环境。

而在海水水族馆中, 珊瑚和鱼类需要 pH 范围更窄的环境, 所以主人经常通过向水中增加碳酸盐“硬化剂”来增加水的碱度使 pH 值保持在 8.0 到 8.4 之间。用一种叫“钙反应器”的装置向碎碳酸钙 (一般是碎珊瑚) 鼓 CO_2 气泡, 则该装置向水中释放钙和碳酸根离子, 这样可以提供一种让水族馆中的珊瑚和其他钙化生物健康成长的高碱度、钙丰富的环境。不幸的是, 这种装置不能用在全球尺度上解决海洋酸化问题, 这是因为在海洋中实施这个过程需要大量的碎碳酸钙。

— Helen Findlay, Lord Kingsland 研究员, 英国 Plymouth 海洋实验室; Joan Kleypas, 科学家, 美国国家大气研究中心; Michael Holcomb, 博士后研究员, 摩纳哥科学研究中心。

贝类生物能在 pH 低至 5 的淡水中生存, 那还有什么问题呢?

生活在低 pH 值的淡水或海水中的生物发展了一种能在低 pH 环境下生存的适应机制。相反, 在高 pH 且 pH 值相对稳定的海水中进化的贝类对环境 pH 值的变化比较敏感。一个很好的例子就是生活在河口环境中从海洋生物向淡水生物转化的过渡物种。一种海洋贝类, *Thais gradata*, 在河口的淡水端的溶解速率比在海水端高, 这是因为淡水端的 pH 值比较低而且变化范围大, 而海水端 pH 值较高而且变化范围小。

— Helen Findlay, Lord Kingsland 研究员, 英国 Plymouth 海洋实验室。

为什么增加海水中溶解 CO_2 的浓度会影响海洋生物的壳体生长呢?

向海水中溶解 CO_2 会导致海水碳酸盐的一系列变化。溶解 CO_2 、总溶解无机碳和碳酸氢根离子浓度升高，而 pH 值、碳酸根离子浓度和碳酸钙饱和度下降。这些变化中的一个或多个可以影响海洋生物壳体的生长。大部分海洋生物骨骼或壳体的形成都是一种内部过程，在这个过程中大部分生物把碳酸氢根转化成碳酸根从而形成碳酸钙。但是这种转化会产生质子（氢离子），因此生物必须消耗能量把质子排到体外环境（海水）中。为什么海洋酸化会降低钙化速率的一种假说是，当海水 pH 降低时，生物需要更多的能量才能把钙化过程中产生的质子排到体外，这是因为 pH 值降低时它们工作在一个反向梯度更大的环境。这解释了为什么很多钙化生物在遇到生理上的不利环境（如缺少食物）时钙化速率会降低。也就是说，增强环境压力会使钙化生物用于钙化的能量降低。海洋酸化还通过生理作用间接影响壳体的形成。例如，改变呼吸作用会影响能量的收支，从而改变动物生成壳体物质的能力。尽管在酸化条件下有些海洋生物的壳体也可以正常生长，但是暴露的部分壳体的溶解速率会增大，因此生物需要在维护壳体上花更多的能量，从而使繁殖或其他生命活动中的能量相应减少。

— *Helen Findlay, Lord Kingsland 研究员, 英国 Plymouth 海洋实验室; Anne Cohen, 研究员, 美国 Woods Hole 海洋研究所; Joan Kleypas, 科学家, 美国国家大气研究中心。*

科学家的研究表明，当龙虾（和其他食用动物）生活在高 CO_2 环境中时它们的壳会变厚，那为什么还我们担心海洋酸化呢？

至少有一项实验研究表明，把包括龙虾在内的甲壳类动物放在 CO_2 升高环境中培养 60 天后壳体确实变厚了。生成壳体需要能量，因此壳体增厚几乎只能以降低其他活动（例如生长和繁殖）的能量为代价。另外，龙虾和其他甲壳类动物在生成壳体时通过一种不同于其他海洋生物的机制完成，这个过程既需要碳酸钙也需要甲壳素。它们不是以恒定的速率生长的，而是定期蜕皮，而且把旧的骨架中的很多物质放到新的骨架中。由于在上述实验中未监测能量和物质收支，所以海洋酸化如何影响这些生物整体的健康状况和寿命仍是未知的。

— *Anne Cohen, 研究员, 美国 Woods Hole 海洋研究所; —Helen Findlay, Lord Kingsland 研究员, 英国 Plymouth 海洋实验室。*

个体与生态系统

如果一些钙化物种离开某个区域，难道生物体和生态系统不会适应吗？

人类活动驱动的海洋表层酸化的速率比过去几千万年全球海洋生态系统所经历的海洋酸化速率高 100 倍。不同的生态系统对海洋酸化的响应是不同的。在一些生态系统中，例如珊瑚礁，钙化生物形成生态系统最基本的架构，因此如果钙化生物（例如珊瑚礁）消失了，则生态系统就会消失。在钙化生物发挥作用较小的其他生态系统中，钙化物种的殒灭对生态系统的影响还不是很清楚。在当今海洋酸化这样的海洋化学快速变化的过程中，生物体会做出如下三种反应之一：驯化、适应或灭绝。如果大部分生物能很快地驯化，则生物多样性和生态系统的功能可能可以相对不发生变化。然而，进化适应是世代的时间尺度，因此成熟较慢的长寿命物种很难有机会去繁殖能适应快速变化环境条件的后代。即使繁殖快得多的物种也未必能适应，例如，几百万年来，生活在在适宜的温度和水化学条件边缘区域的珊瑚一直在试图适应较低碳酸根离子浓度的环境，但是他们竞争不过那里的藻类和其他非钙化生物。因此，看起来在几十年中珊瑚不大可能成功地适应新的温度和水化学条件来应付海洋酸化。如果海洋酸化使食物网上的关键物种的丰度变化或灭绝的速率发生大的变化，则可以预料生态系统的功能会发生重大变化——能量和物质如何从浮游植物等初级生产者流到鱼类和动物等捕食者都会发生大的变化。

生态系统是生物和环境之间复杂的相互作用网，因此如果改变其中任何一个则很难预测它会对整个生态系统造成的全部的生态影响。从 CO_2 鼓气实验可知，海洋酸化对生物物种的影响是不同的，而且海洋物种的组成可能会发生转变，导致生物多样性降低和生态系统的总体功能发生变化。我们依赖海洋生态系统提供全方位的服务，包括从渔业获得的食物、旅游和休娱乐业的收入、生物地球化学过程产生的氧和营养物质等。所有这些都会因海洋酸化发生改变，或者在很多情况下发生退化。例如，想象一下，海胆消失或经济鱼类的幼苗量下降会对日本渔业产生多大的经济影响。而且，钙化生物的减少或消失会影响到：（1）化学环境；（2）依赖钙化生物的其他钙化生物或非钙化生物（例如，很多生物体和依赖珊瑚礁的千百万人口）；（3）地球上的碳储量（钙化生物产生的“岩石”沉降到海底形成大量“白垩”沉积物，从而把碳封存在地质结构中）。就如在鱼类

和贝类被藻类替代的荒废的水生生态系统中，海洋生态系统可以自发调节，但是可能对人类用处不大或人们不希望的物种丰富起来，这使得人们从改变了的生态系统得不到传统的资源和服务，或与以前不同，或发生预想不到的变化。

— *Debora Iglesias-Rodriguez*, 讲师, 英国南安普敦大学国家海洋中心; *Scott Doney*, 资深科学家, 美国 Woods Hole 海洋研究所; *Steve Widdicombe*, 底栖生物学家, 英国 Plymouth 海洋实验室; *Jim Barry*, 资深科学家, 美国 Monterey Bay 水生研究所; *Ken Caldeira*, 资深科学家, 美国 Carnegie 科学研究所; *Jason Hall-Spencer*, 海洋生物学讲师, 英国 Plymouth 大学。

海洋酸化会杀死所有的海洋生物吗？

答案是否定的。然而，很多科学家认为海洋酸化会导致海洋生态系统发生重大转变。这种预测在很大程度上是以地质历史为依据的。几百万年前，在海洋酸化事件中海洋生态系统经历了快速的变化，包括一些物种的灭绝（见下面的“地质历史”）。今天，一些物种和生态系统正受到海洋酸化的威胁，尤其是受到海洋酸化与其他气候变化（如海洋变暖）相结合的条件威胁。这些例子包括热带珊瑚礁、深海珊瑚礁和水中会游泳的蜗牛状动物。这些物种在海洋中发挥着重要的作用，因为它们一方面构建三维结构，为相当大的生物多样性提供生存空间；另一方面，它们是食物链的组要组成部分。一些产生碳酸钙结构的物种，例如珊瑚，也向人类提供食物、保护海岸线、支持旅游业等关键服务。可以在“香槟地点”（喷出 CO₂ 的海底火山的喷口和从水柱升起小气泡的这种自然酸化周围水环境的地点）找到海洋酸化的生态效应的证据。例如，在意大利的伊斯基亚岛（Island of Ischia）一个这样的环境中的实验表明，当达到 2100 年大气 CO₂ 浓度的海洋酸化条件时，生物多样性减少了 30%。

— *Jean-Pierre Gattuso*, 资深科学家, 法国巴黎六大国家科学研究中心; *Jason Hall-Spencer*, 海洋生物学讲师; 英国 Plymouth 大学。

生物体对变暖和酸化的响应会互相抵消吗？

从原理上讲，变暖可能会对钙化过程有一定的好处，因为在一定温度阈值范围内碳酸钙的沉淀过程会随温度的升高而增强。然而，生物体习惯于生活在一个有限的温度范围内，而在这个温度范围以外的环境中生活/生长得不好。在很多

海洋环境中，生物体（钙化生物，非钙化生物也一样）已经暴露在它们适宜温度范围的上限。对蟹和鱼类的初步实验研究表明，如果暴露在 CO₂ 排放持续增长的 CO₂ 水平中，动物抵御极端温度的能力就会下降。对珊瑚的研究也表明，CO₂ 增强生物的热灵敏度，在这种情况下，容易触发由变暖引起的珊瑚“白化”事件。总体来讲，看起来海洋酸化可能增强生物体对气候变暖的敏感性。

— Hans-Otto Pörtner, 教授, 德国 Alfred Wegener 研究所。

如果生物体在幼年敏感时期能够在海洋酸化效应中生存下来,那么成年后它们是否就安全了呢?

对一般的海洋生物来说，生物配子、卵、不同阶段的幼体、青少年和成体受海洋酸化的影响程度是不同的，因为它们对环境压力的忍耐程度和应对策略是不同的。在有些情况下，生命的早期阶段对环境压力较敏感；而在其他情况下成体对环境压力较敏感。需要对生物的所有生命阶段做必要的实验去了解海洋酸化对生物体的全面影响，并且突出薄弱环节。如果较少的幼体能活到成年，则该生物的总量就会明显减少。持续的环境压力通常会限制生物体的顺利生长（例如，在环境压力生活下的生物体生长较慢而且个体较小；在环境压力生活下的捕食者灵活性较差；在环境压力生活下的猎物逃避捕食的能力较差），造成生存能力减弱，最后使种群数量受损。对成体来说，海洋酸化效应产生的环境压力也许不影响它们的日常活动，但是最终使它们的生长和繁殖速率降低。降低繁殖速率也响应种群的数量。对生物任何生长阶段的影响都可能降低种群增长的潜力或影响它们从环境压力或扰动造成的损失中的恢复能力。

— Jim Barry, 资深科学家, 美国 Monterey Bay 水生研究所; Helen Findlay, Lord Kingsland 研究员; 英国 Plymouth 海洋实验室。

CO₂ 是呼吸作用的产物,动物呼吸过程中一直吸入或呼出 CO₂。那它怎么可能是有毒的呢?

跟在海水中一样，呼吸作用产生的 CO₂ 使细胞内的 pH 值降低。生物体在进化过程中形成了与自身 CO₂ 产生速率一致的缓冲 CO₂ 影响，并把 CO₂ 传输和转移到细胞外的机制。海洋酸化减小动物身体内外的 CO₂ 浓度差，因此会阻碍 CO₂ 的移出，从而造成“呼吸性酸中毒”。（这个术语类似于“海洋酸化”，因为正

常的体液是弱碱性的)。呼吸性酸中毒除了引起其他生理效应外,还可能降低新陈代谢和生物体的活性。此外,很多细胞的功能对 pH 值很敏感,因此酸中毒可能产生负面影响。例如,血液中的呼吸蛋白质(例如血红蛋白)在高 pH 值下与氧结合,并在低 pH 值下将氧释放出来,这样就能在鳃中把氧结合起来而到细胞内再把氧释放出来,这是因为体内新陈代谢产生的 CO₂ 使体内的 pH 值降低。很多生物体可以通过改变体内的离子平衡来抵御呼吸性酸中毒。然而,它们能否在长时间内维持这么大的离子非平衡状态还是未知的。

— Brad Seibel, 生物学助理教授, 美国罗德岛大学。

地质历史中的海洋酸化

在地质历史中珊瑚已经经历了其他海洋化学环境的变化并生存下来,那为什么海洋酸化还会导致珊瑚灭绝呢?

海洋酸化的危险来自目前的变化速率、预测的大气 CO₂ 浓度,以及如果保持目前的 CO₂ 排放速率所导致的大气 CO₂ 浓度的变化量。目前大气 CO₂ 浓度的变化率是每年约升高 2 ppm。从工业革命开始到现在大气 CO₂ 的浓度已经升高了 100 ppm。在上个冰期末期和目前这个暖期的过度时期的 1 万年中大气 CO₂ 浓度仅升高了 80 ppm,所以现在大气 CO₂ 浓度升高的速率比地质历史时期的最快速率还高 100 倍。除了有时物种的大量灭绝,没有大气 CO₂ 浓度以现在的速率或以比现在还快的速率持续变化的地质记录的证据。即使在地质历史中海洋化学发生极端变化的时期(例如在古新世/始新世最热的 5500 万年前,大部分深层和中层海洋的碳酸盐矿物溶解),这些变化可能是发生在几千年间的。在地球的历史上,珊瑚确实经历了几次灭绝事件并生存下来了,但是在每次灭绝事件后,他们的“反弹”都需要几百万年的时间,而恢复造礁能力则需要更长的时间。最早的珊瑚出现在 4 亿年前的奥陶纪,那时的 Tabulate 和 Rugose 珊瑚与现在生存的珊瑚大不相同(现代珊瑚属于石珊瑚(Scleractinia),可能是由早期的物种单独进化而来的),而奥陶纪珊瑚礁系统主要由海绵构成,而不是由珊瑚构成的。在 2.51 亿年前的二叠系三叠系灭绝事件中,奥陶系珊瑚灭绝了,而其他不同的珊瑚最终得到进化,并在白垩纪与生成了巨大珊瑚礁的造礁双壳类珊瑚一起蓬勃发展起来,但是其中的大部分在 6500 万年前的白垩纪灭绝事件中跟恐龙一起灭绝了。尽管那时珊瑚礁消失了,但是约一半的珊瑚物种生存下来,而且要经过几百万年

才恢复成为以前那样普遍存在的物种。通常，海洋生物可以通过适应和进化从灭绝事件中恢复过来，但是那需要约 1 千万年的时间才能达到灭绝以前的生物多样性水平。

— *Jim Barry*, 资深科学家, 美国 Monterey Bay 水生研究所; *Daniela Schmidt*, 高级研究员, 英国布里斯托 (Bristol) 大学; *Ken Caldeira*, 资深科学家, 美国卡内基 (Carnegie) 科学研究所。

现在海洋化学的变化与以前地质时期的变化有什么不同?

现在的条件与以前的主要区别是大气 CO₂ 的变化速率与正在减轻的地质过程的速率不匹配。如果象在奥陶纪那样在数十万年的时间中通过火山和植物活动缓慢地增加 CO₂, 那么进入海洋的 CO₂ 有时间在海洋中进行从表层直到底层的混合。结果是, 尽管海洋吸收大气 CO₂ 的量很大, 但是它们被分散到很大体积的海水中, 由此造成的 pH 值降低量是很小的。同时, 在千年尺度上随着深海 CO₂ 浓度的升高, 海底的碳酸盐开始溶解并释放出碳酸根离子中和部分酸, 从而减小 pH 值的降低量。过去海洋中的钙、镁离子浓度更高的, 这也有利于稳定海洋动物骨骼中的碳酸盐矿物。

今天, 大气 CO₂ 浓度以比大洋混合速度快得多的速率升高。在这个“短”时间尺度上 (< 1 万年) CO₂ 的释放过程中, 沉积物调节海洋化学的能力几乎不起作用, 因此海洋的 pH 值和碳酸钙饱和度都在下降。尽管在过去的 200 年中进入海洋的 CO₂ 的量比奥陶纪的量小, 但是他们确实在海洋表层形成了较高的 CO₂ 浓度。结果, 上层海洋的 pH 值降低更快, 而且降低量也比地质时代的 pH 值降低量更大。pH 值的变化速率和变化量都给在过去海洋中较小和较慢的 pH 变化中进化来的海洋生物带来了问题。

— *Chris Langdon*, 副教授, 美国迈阿密大学; *Andy Ridgwell*, University Research Fellow, 英国布里斯托大学英国皇家学会; *Richard Zeebe*, 副教授, 美国夏威夷大学 Manoa 校区; *Daniela Schmidt*, Senior Research Fellow, 英国布里斯托大学。

科学方法

因为科学家有时向海水中加矿物质酸而不是加 CO₂ 把 pH 值降低到要达到的水平, 所以对生物体的实验经常是不切实际的。

当通过加入矿物质酸调节海水的 pH 值时,同时也会加入等摩尔的碳酸氢钠,这个方法可以完美地模拟吸收大气 CO₂ 引起的海水碳酸盐化学的变化。即使通过加入矿物质酸而不加入碳酸氢根或碳酸根离子调节海水来模拟海洋酸化,对于 pH、pCO₂、碳酸根离子和碳酸盐饱和度来说与鼓 CO₂ 气体调节几乎是没有什么区别的。在不同的处理方法中,鼓 CO₂ 气体确实会产生稍微高一点的碳酸氢根离子浓度。然而,两种方法都会造成碳酸氢根离子浓度升高。事实上,在通过加入矿物质酸和 CO₂ 曝气酸化海水的实验中,未发现钙化生物响应的系统的差别。

— Ulf Riebesell, 生物海洋学教授, 德国 Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR。

既然科学家承认关于气候变化还有不确定性,那么海洋酸化在多大程度上是确定的呢?

海水化学正因大气 CO₂ 浓度升高而发生变化,以及人类燃烧化石燃料和破坏森林是其根源方面已经没有争议了。海洋酸化对生物的影响还不确定,但是,这主要反映了不同生物种群对海水化学的变化表现出的敏感性范围很大的事实。科学界对海洋酸化正在发生、海洋酸化会对大量海洋生物产生正面或负面的重大影响已有广泛的共识。

— Scott Doney, 资深科学家, 美国 Woods Hole 海洋研究所。

海洋酸化的“证据”是互相冲突的,所以科学家之间的观点也不统一。

在表明海洋酸化正在发生的化学数据上没有不同意见。然而,生物数据显示,不同生物对海洋酸化的响应是不同的。对相同物种的实验有时会产生显然不同的结果,这一点看起来有些奇怪。然而,显然生物对 CO₂ 水平升高的响应不仅受生物物种的影响,还受它生活中所经历的环境条件的影响。因此,从不同区域、不同生物密度或不同品系采集的相同物种会做出不同的响应。这个证据不应该看成是互相冲突的,这是存在于种群中的自然多样性。我们只有通过测定和了解这种多样性才能预测哪些物种、群落和生态系统正因为海洋酸化而面临着最大的危险。

— Steve Widdicombe, 底栖生态学家, 英国 Plymouth 海洋实验室。

观测到的海洋酸化的影响是否可能来自实验本身呢？因为在实验中只是简单地把它们直接放到几十年或几百年才能达到的 CO₂ 水平的水中，它们可能会受到惊吓。

在海洋酸化响应实验中，通常不是直接把动物放到富含 CO₂ 的水中，而是把它们放在与严格控制的气体混合物达到平衡的水中。尽管不可能实施实验模拟大气和海洋中人为 CO₂ 的累积速率，但是实验中用的 CO₂ 水平远低于对它们造成惊吓的水平。然而，这些 CO₂ 水平可能会通过在短时间尺度上以看起来比较缓和的方式干扰它们的生理过程（酸-碱调节、幼体的发展和生长）。因此，通常需要长时间的暴露实验来研究这些 CO₂ 水平是否是有害的，并造成死亡。在长时间尺度上，即使对动物个体健康的很小的损伤也可能会对这个物种产生伤害，例如，物种与生态系统中其他物种的竞争，或将它们暴露在极端温度这样的应激环境中都会对该物种造成伤害。

— *Hans-Otto Pörtner*，教授，德国 Alfred Wegener Institute。

地球工程与海洋酸化的缓解

如果我们增加水产养殖，养殖更多的甲壳类生物，那么这些甲壳会固定 CO₂ 吗（就象树木那样）？

钙化过程确实吸收碳，但是这个过程导致海水的碳化学发生转变，产生低 pH 和高 CO₂，但不移除 CO₂。很多生物体通过把碳酸氢根转变成碳酸根来构建它们的外壳，这个过程产生氢离子，促进海洋酸化。例如，大部分珊瑚礁在我们所关心的时间尺度上是大气 CO₂ 的弱源，而不是汇。从生态系统角度，即使精心设计的水产养殖也会通过改变海岸景观、增加污染和疾病、向环境释放转基因物种或外来物种等而对环境造成意想不到的破坏。所以任何以减缓海洋酸化为目标的活动都应该考虑更大的环境空间，防止以对环境的一个影响来取代另一个影响。

— *Anne Cohen*，研究员，美国 Woods Hole 海洋研究所； *Steve Widdicombe*，底栖生态学家，英国 Plymouth 海洋实验室。

解决气候变化的地球工程对解决海洋酸化也有帮助吗？

人们最常建议的限制气候变化的地球工程方法试图不触及问题的根源（环境中过量的 CO_2 ）而缓解气候变化的症状。大部分环境工程方案涉及我们排放的 CO_2 造成的气候后果，而不是化学后果。例如，企图通过把多余的太阳光反射回太空来冷却地球的策略对地球化学的直接影响非常小，因此不会显著减轻海洋酸化。

一些方案试图通过向海洋加入化合物从化学上中和酸来减小海洋的化学变化。然而，通过这种方法逆转海洋酸化需要比我们释放到大气中的 CO_2 的量更多的物质。因此，这些建议的方法需要与目前的能源系统一样大的新的矿业和化学处理基础设施。因此合理的建议是，把这个水平的努力和花费更好地用在把我们的能源系统从依赖于有限的化石燃料资源转到可再生的、无限的资源上。这种可再生的、无限的资源在 CO_2 的产生地就将其消灭，防止 CO_2 进入环境，而不是在 CO_2 已经进入大气和海洋后再去考虑如何中和其影响。

— *Ken Caldeira*, 资深科学家, 美国 *Carnegie* 科学研究所。

把大气 CO_2 浓度控制在 350 或 400 ppm 以下会停止海洋酸化吗？

大气 CO_2 浓度已经达到 390 ppm 了，而且仍然以每年 2 ppm 的速度在上升。如果 CO_2 排放量没有大幅度减小，则大气 CO_2 浓度还会持续上升，而且大部分 CO_2 排放预测的结果显示在不远的将来大气 CO_2 浓度上升的速率还会增长，而不是下降。因此，解决海洋酸化的第一步是稳定 CO_2 的排放量，然后最终减少 CO_2 的排放量。大气 CO_2 浓度的峰值很可能会远高于 400 ppm，原因是未来 5 年 CO_2 排放量的增长不会停止。大气 CO_2 浓度峰值对海洋生物的影响是持久性的。从长远来看，通过自然或人工吸收原理减少大气 CO_2 浓度是可能的。海水化学是可逆的，如果大气 CO_2 浓度恢复到 350-400 ppm，则 pH 和碳酸盐饱和度可以回到目前的条件。然而，一些研究表明，当今的条件对某些生物可能是有害的，而且在 CO_2 浓度最高条件下海水酸化对生物的影响是否是可逆的还不清楚。即使我们把 CO_2 的排放量稳定下来，化石燃料产生并滞留在大气中的 CO_2 在接下来的几百年中还会继续渗透到深层海洋中，影响冷水珊瑚等深海生物。

— *Scott Doney*, 资深科学家, *Woods Hole* 海洋研究所。

政策制定与决策

如果我们牺牲海洋,让它们继续吸收大气CO₂来缓冲气候变化是否更好呢?

海洋酸化和气候变化是相同事物的两个方面,都是人为 CO₂ 排放的直接后果,两者是密不可分的。目前海洋吸收了人为 CO₂ 排放量的四分之一,这确实对大气 CO₂ 浓度升高起了缓解作用。但是,这个“服务”只是减弱气候变化但不能抑制气候变化。从长远来看,在几万年的时间尺度上,大部分(80-90%)的人为 CO₂ 都会进入海洋。然而这并不能保护气候系统使其在这个时期不发生全球变暖。同时需要指出的是,海洋吸收 CO₂ 的效应会对地球系统的功能产生深刻的影响。海洋在生物地球化学循环中充当着重要的角色,不仅调节 CO₂,而且调节氧的产生、氮和其他重要营养盐的循环,以及影响形成云的气体的产生。很多物种是海陆两栖的,很多人以健康的海洋维持生计。海洋不是一个独立的实体,而是地球系统一个不可分割、相互关联的部分。

— *Ulf Riebesell, 教授, 德国 Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR;*
Joan Kleypas, 科学家, 美国国家气候研究中心。

现在采取措施太晚了吗?

我们的技术和经济手段可以实现到本世纪中叶改变我们的能源和交通运输系统及土地耕作方式以便在经济上在很大程度上减少 CO₂ 的排放量。尽管实现这个目标的代价(可能是目前全球经济产值的 2%)可能还是比较小的,但是目前对社会来说决定实现这个转变还是比较困难的。

— *Ken Caldeira, 资深科学家, 美国卡内基 (Carnegie) 科学研究所。*

为什么实施海洋酸化研究很重要? 科学家能做什么?

与陆地环境相比,我们对海洋及其海洋生态系统的了解是非常少的。随着目前技术的发展,我们的知识在迅速增长,然而仍有很多未知的东西。如果政策的制定者想做出关于气候变化和海洋酸化的明智的决策,则科学家需要为他们提供最好的信息。这就需要科学研究。每个人都必须认识到,获得和传播知识需要很多努力,而且保持研究人员、领导和公众之间通畅的、公开的交流是非常重要的。

科学家已经回答了“海洋酸化是真的吗”这个问题。回答是肯定的。现在我们面临着另外的问题“海洋酸化会变到怎样恶劣的程度?”和“应该怎样做?”。大部分科学家赞同减少温室气体的排放是第二个问题最好的答案。剩下的问题最

难回答，但也是最需要回答的问题，这是因为我们深知，在我们能预见的将来 CO₂ 水平还会继续升高。现在很多科学家的重点放在多高浓度的 CO₂ 对地球和社会是“危险的”。回答“我们能做什么？”这个问题就要从对于问题的起因 (CO₂) 我们能做什么转移到对于它的后果我们能做什么。实际上，我们在寻求问题的答案。“未来海洋生态系统会变成什么样子？海洋生态系统会为地球和人类提供什么样的服务？”这是很大的挑战。很多这类问题证明，海洋酸化是个能产生复杂后果的简单问题。

— Joan Kleypas, 科学家, 美国国家气候研究中心; Carol Turley, 资深科学家, 英国 Plymouth 海洋实验室; Robert Key, 研究科学家, 美国普林斯顿大学。

如果海洋酸化的潜在后果那么严重，那为什么不把它加到联合国气候变化框架公约 (UNFCCC) 的缔约国大会 (COP) 的减缓气候变化的谈判中呢？

尽管科学家几十年前就知道因为大气中 CO₂ 浓度升高了，所以海洋酸化一定会发生，但是海洋酸化对海洋生物的影响是到最近十年才认识到的。那时，海洋学家发现，海洋酸化影响很多海洋生物形成外壳或骨架的能力。从那时起，海洋酸化对更广泛的生物种类和海洋过程的更多影响才逐渐被发现。因为对科学的认识过程依赖于正式的研究过程、同行评阅和发表过程，所以新的发现被科学界证实和接受是需要时间的。然而，IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会) 第四次评估报告已经把截至 2007 年海洋酸化足够的证据写到提供给政策制定者的总结中了。“由大气 CO₂ 浓度升高导致的海洋的逐渐酸化预计会对生成壳体的海洋生物，例如珊瑚，和以这些生物为生的其他生物产生负面影响。”海洋酸化及其效应已经被科学界广泛接受，而且还会在 IPCC 的第五次评估报告中认真解决。事实上，尽管在拟订的协议中关于海洋的具体考虑还很少甚至未提及，但是海洋酸化已经是诸如 2009 年 12 月在哥本哈根举办的 COP 15 (第 15 次缔约国大会) 气候谈判的附带活动，例如“海洋日”上的一个重要议题。

— Joan Kleypas, 科学家, 美国国家气候研究中心, ; Carol Turley, 资深科学家, 英国 Plymouth 海洋实验室。