酸试验:

我们能从二氧化碳的危害中拯救我们的海洋吗?

Ellycia Harrould-Kolieb
Jacqueline Savitz

2009年6月第二版

致谢

作者谨向以下各位同仁表示诚挚的谢意，
感谢他们对本报告所做的贡献：

Hirshfield, Ph.D, Joanie Kleypas, Ph.D, Jeff Short, Ph.D, Rachel Jakuba, Ph.D, Andrew Collier, Monica Perez Watkins and Lynn Englum.

我们也特别感谢**Scheman** 基金会对**Oceana**致力于减少气候变化对世界海洋影响的工作的大力支持。

中文版本翻译：杜勇博士 **Dr. Yong Du**

目录

2	执行摘要
6	引言
	什么是海洋酸化？
8	海洋化学
11	海洋酸化的影响
16	对海洋生命的生理影响
17	对生态系统的影响
20	海洋酸化对人类的影响
22	到达极限
24	解决方案
25	建议
26	尾注

Photo: NOAA/James Walter

OCEAN ACIDIFICATION

“海洋不仅正在变暖和升高，
而且正在变得更加酸化。”

执行摘要

© OCEANA / ZOEA

引言

气候变化已经被广泛地认为是我们这个时代最严重的环境挑战。这不仅意味着环境或者“大自然”正处在危险之中。我们人类同样也将遭受由此带来的恶果。实际上，我们根本不可能独立于周围的环境，因为我们必须依赖自然环境的恩赐 -- 从我们呼吸的空气和适宜生存的气候，到我们要吃的各种谷物。我们都知道，地球的自然环境恰恰好适宜于我们的生存。但不幸的是，我们现在的很多行为正在改变着地球大气中各种气体成分的平衡，而正是这些气体帮助我们维持着地球的正常温度和气候。

不断增长的温室气体排放量，主要是二氧化碳，正在将更多的热量留在了大气之中，从而导致地球表面的温度上升。结果如何呢？冰盖融化，海平面上升，平均温度增高，野生动物的种群数量改变，新型疾病产生，以及严重的干旱和风暴增多。

被扰乱的气候系统将极大地改变这个星球上人们的生存方式。可以预见，将会有更多与热有关的疾病和死亡，以及由于更多的严重干旱所导致的粮食供应和粮食价格的波动。在一些国家可能会出现大范围的粮食短缺，甚至有可能是饥荒。上升的海平面将淹没巨大范围的海岸带。在未来的一百年里，一些世界上最大，最重要的城市，包括纽约市，曼谷和伦敦将受到洪水的威胁，甚至全部被沉浸在水中。有的是整个国家，例如，孟加拉国以及大多数比较小的岛屿国家将失去主要的陆地面积，从而迫使数以百万计的，由于气候变化而造成的难民逃离这海平面升高所影响到的区域。

在气候系统被扰乱的同时，我们的二氧化碳排放量正在对世界海洋构成严重的影响， 而这种影响往往不易被直接察觉。海洋大约吸收全球二氧化碳排放量的百分之三十和由温室气体增加所产生的热量的百分之八十，从而在一定程度上减缓了某些可能发生的气候变化。[1,2] 但是，这种缓解是付出了巨大的代价的。它不仅使海洋变暖，海面升高，而且也使海洋变得更加酸化。

海洋中二氧化碳数量的不断增加会产生各种化学反应，这些化学反应又改变着世界海洋的化学性质。这个过程就叫做海洋酸化。海洋酸化威胁着像硬珊瑚，蛤和蟹一类的，可以生成碳酸钙壳和骨骼的海洋生物。海洋中超量的二氧化碳所产生的酸会消耗掉这些海洋生物用于生成它们的壳和骨骼的材料，从而使它们无原材料可以利用。这使得珊瑚和其他海洋动物，越来越难以增强它们现有身体组织，更难以构建新的身体组织。如果海洋酸化继续下去，海洋生物所赖以生存的水，可能会变得具有腐蚀性，以至于可以直接分解这些海洋生物的甲壳与骨骼。

在我们对造成海洋更加酸化的化学过程有了充分了解，并且接受了这些事实的时候，我们才刚刚开始了解酸化过程可能对海洋野生动物造成广泛的影响。酸度增加可能不会直接杀死非钙质的生物体，但很可能通过不同的方式，损害他们整体的适应能力和生存能力。这些影响可能包括生长速度减慢，繁殖量减少，呼吸系统和神经系统功能受到损害，抗御天敌和疾病的能力变弱等。所有这些都可能通过食物链和生态系统而产生波纹扩散效应。最终，海洋酸化可能将改变海洋，使海洋只剩下少得可怜的生物物种和生产力，也使那些依赖于它们而存在的生命和生计，由此变得非常不确定。

斯坦福大学海洋学家 **Ken Caldeira** 和他的同事认为：

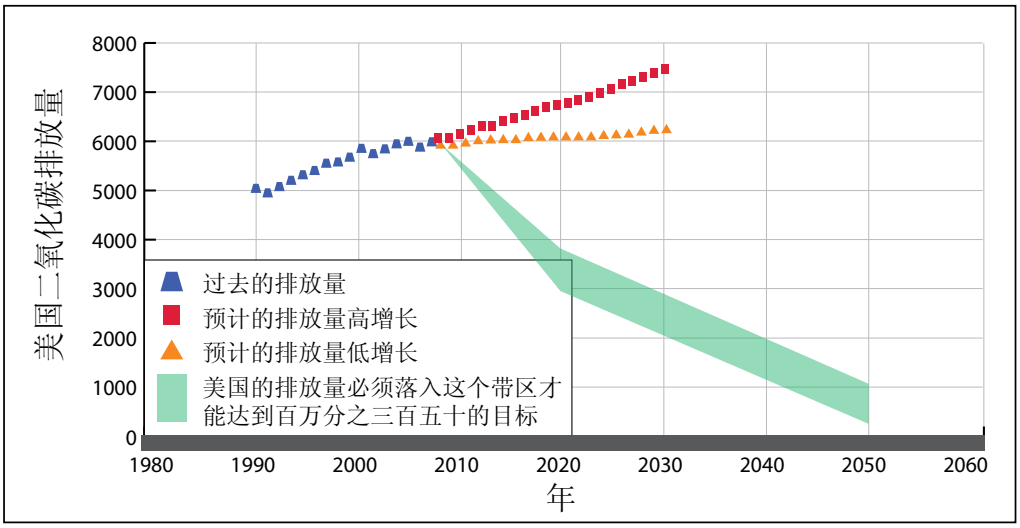
“二氧化碳的化学效应对海洋环境的影响，可能像二氧化碳的辐射效应对地球气候的影响一样令人担忧。”[3]

“我们等待行动的时间越长，
要避免灾难的难度就越大。”

到达极限

目前大气中的二氧化碳浓度已经超出安全水平。从大堡礁珊瑚生长率的持续下降，到大规模热带珊瑚的褪色事件，由其造成的显著变化已经遍及世界各个海洋。珊瑚礁为四分之一的海洋物种提供了重要的栖息地，这对许多人的生存和生计是至关重要的。如果听任珊瑚礁消失，将导致整个海洋产生难以容忍的变化，并对千百万人的生活产生重大影响。在珊瑚礁所发生的事件，将预示着由海洋酸化和气候变化所造成的灾难性变化，可能会遍及世界不同的地方。

预计美国的二氧化碳排放量与排放量为百万分之三百五十的图示



Source: Oceana, based on EIA (2008) and IPCC (2007)

为了防止珊瑚礁消失，并最终避免气候变化的危机，我们必须将大气中的二氧化碳减少到低于百万分之三百五十 (350ppm)。[4] 不幸的是，现在大气中的二氧化碳已经达到百万分之三百八十五，并且仍然在攀升。[5] 这个水平已大大超过人类有文明史以来的任何时候。[6]

当今的社会中，二氧化碳的排放量直接与我们不断增长的能源需求相联系。美国能源情报署 (EIA) 最近公布的最新数字表明，如果保持我们目前的状况一切照旧，现行法律和政策也保持不变，将导致2030年的世界能源消耗高于2005年水平百分之五十以上。[7] 这意味着大气中的二氧化碳浓度超过百万分之五百七十。[8]

如果我们继续保持目前的排放方式，珊瑚礁将继续退化，并可能被推过一个临界点，这个临界点可能发生在，当大气中的二氧化碳约为百万分之四百五十左右的时候。在这一临界点上，据我们所知，珊瑚礁将面临灭绝的危险。一旦超过这个临界点，珊瑚礁将迅速萎缩，[9] 并且至少有一半与珊瑚礁有关的野生动物将成为稀有动物或者灭绝。接着，珊瑚礁生态系统可能会减少到, 只有极少残存钙质珊瑚的崩溃状态。[10] 珊瑚礁是历经几十年甚至几百年而形成的，因此，一旦遭受到这种程度的损害，所造成的影响将不是几代人可以逆转的。

要通过控制海洋酸化来挽救珊瑚礁，我们必须将大气中的二氧化碳浓度稳定在或低于百万分之三百五十。这样做，我们也可以防止其它与气候有关的灾害。目前大气中二氧化碳浓度已经超过了这一水平，并且预计在未来几十年将可能持续增长。因此，至关重要的是在未来几年采取正确措施，以确保二氧化碳排放量的峰值得到控制，并使其在未来的十年中开始下降。

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的结论是，为了使大气中的二氧化碳稳定在百万分之三百五十，全球二氧化碳排放量在2050年需要削减到低于2000年百分之八十五的水平[11]，为了达到这个目标， 附件一国家（工业化国家和经济正在转型的国家，如俄罗斯联邦）到2020年需要将其二氧化碳排放量减少到低于1990年水平的百分之二十五到四十。到2050年，需要减少到低于该水平百分之八十到九十五。这些目标并不容易实现，因此，所有国家和有关国际组织必须从现在就采取行动，来达到我们的目标。我们在未来几年里建立和实现我们短期目标的能力，将决定我们能否成功地稳定地球的气候。等待的行动的时间越长，要避免灾难的难度就越大。

© OCEANA / Juan Carlos Calvin

研究成果

本报告突出地强调以下新的研究成果，它们表明海洋酸化已经在发生，并且正在威胁着我们的海洋。同样确认了，如果我们继续超量排放二氧化碳，可能对海洋和海洋生态系统造成的严重后果。

- 大气中现在的二氧化碳浓度高于过去八十万年甚至更远的时间以来的任何一年。[12]
- 自从工业化革命以来，海洋表面的酸性已经增加了百分之三十。[13] 如果目前的趋势继续下去，到本世纪末它可能再提高一倍，[14] 将高于过去两千万年以来的水平。[15]
- 海洋所吸收的二氧化碳数量的增加，改变了海洋中营养物质和化学成分的分布状况，对海洋生态系统和海洋生物有着广泛的影响。[16]
- 较高的酸度也会影响许多物种的生长，繁殖，抗病性以及其它生物和生理过程。[21]
- 许多物种，特别是那些需要生成碳酸钙甲壳和骨骼的物种，将无法适应海洋酸度和碳酸盐含量的快速变化。这可能导致许多物种的种群数量的崩溃，它们包括牡蛎，贻贝，螃蟹和龙虾。[17, 18, 19, 20]
- 依赖于碳酸盐生存的物种，例如珊瑚和翼足目软体动物所受到的影响，可能引起较大的，波及到整个生态系统和食物链的波纹扩散效应，最终甚至影响到海洋中的大型哺乳动物，以及许多商业性渔业。[22]
- 自1980年以来，世界上近百分之三十的热带珊瑚已经消失。这主要是由于气候变暖的活动引起的。按照目前排放量的增长速度，在本世纪下半叶，热带珊瑚会全部消失。[23, 24]
- 如果目前的排放量的趋势持续下去，到2040年冷水珊瑚礁将会受到严重的威胁，到本世纪末，它们的三分之二将可能处在腐蚀性的环境之中。[25]
- 珊瑚礁的消失每年可能将消耗数十亿美元的社会成本，主要是在渔业，旅游业和海岸保护服务方面的损失。[26]
- 超过一亿的人口在经济上依赖于珊瑚礁，[27] 由于与珊瑚礁相关的蛋白质的失去，这部分社会群体可能产生健康问题和缺乏粮食安全的保障。[28]
- 许多商业性的渔业部门依赖于为鱼提供食物和庇护所的珊瑚礁。[29, 30] 珊瑚礁的损失可能使已经萎缩的商业鱼类的种群数量更加不稳定。
- 为了保护珊瑚礁和依赖于珊瑚礁的生态系统，我们必须将大气中的二氧化碳稳定在等于或者低于百万分之三百五十。为了实现这一目标，到**2050**年，全球排放量必须减少到低于 **2000**年百分之八十五的水平，这将要求工业化国家，到**2020**年将排放量减少到低于**1990**年百分之二十五至百分之四十，到**2050**年则要低于该水平百分之八十到百分之九十五。[31, 32, 33]

解决方案

要将大气中的二氧化碳含量减少到百万分之三百五十，我们需要各种解决方案和措施。它们包括：(1) 改变我们的碳基能源经济。通过建设替代能源的基础设施就可以做到这一点。例如太阳能，风能和氢气。同时，如果没有高效的碳捕获技术时，要坚决削减煤炭的使用；(2) 提高小汽车，卡车，火车，飞机和船舶的能源效率，以及在住宅，办公楼，发电和其它工业部门的能源利用率；(3) 减少森林砍伐，同时要种植和培育更多的森林，以帮助“拉低”二氧化碳的水平。如果我们想要挽救珊瑚礁和贝类渔业，以及依赖于它们的生态系统和我们从它们获取的价值，我们必须从现在就开始。到2020年，世界工业化国家需要削减百分之二十五到百分之四十的排放量，已经没有等待的时间了。

U.S. Air Force

建议

制定政策将大气中二氧化碳的含量稳定在百万分之三百五十

各国政府必须致力于将大气中二氧化碳的含量稳定在百万分之三百五十或以下。为了达到这个目标，在未来的五年需要有重大的举措，将整个社会引领到一条正确的道路，以达到在未来几十年做到碳的净排放量为零。

提倡使用高能源效率和低碳的燃料

利用一切机会节约能源，包括改进小汽车，卡车，飞机，船舶的燃料有效利用率，提供更纯净的燃料，投资高效率的集中货装运输，通过协调个人，机构和公司的行动来减少能源消耗。

改用替代能源

禁止新的或扩建的燃煤发电厂以及其它扩大使用煤炭的生产方式，直至造成全球变暖的污染物可以被捕获和安全储存。在这些地方，政府和私营部门应执行各种方案，以刺激开发和利用可再生能源的途径，如风能和太阳能，并投资提高国家输电电网，从而使其它资源产生的能量可以低成本有效地进入市场。各国政府应立即取消所有鼓励使用矿物燃料的补贴。目前处在敏感生态系统区域，如北极和近海一带，的矿物燃料应当继续保留在那里。

碳排放规范化

各国政府应立即着手建立碳排放的规范化系统，对排放者收取排放成本费，并阻止那些损害海洋的持续不断的排放。那些没有被规范化的二氧化碳排放源，例如来自海上航运和飞机的排放，应包括在后京都协定，并通过有关的国际机构，例如国际海事组织和国际民用航空组织，进行监管。

保护自然的恢复能力

为了维护海洋生态系统的自然恢复能力，应该减少另外一些由人类所造成的威胁，如过度捕捞和污染。海洋酸化和气候变化的威胁不是孤立的，它们与生态系统和物种所遭受的其它影响紧密相关。如果海洋生态系统的生存不同时受到其它的威胁，它们就会有最好的机会，从海洋酸化的压力下得到解脱。

引言

我们持续地燃烧矿物燃料正在使大气中二氧化碳含量增加，也使那些先升入大气，最终又落入海洋中的二氧化碳增加。因此，自工业革命（约1750年）以来，海洋已经吸收了大量的二氧化碳。正是海洋中增加的这些二氧化碳，导致了海洋酸化。

当二氧化碳进入海洋与海水相结合产生碳酸，从而提高海水的酸度，降低了海水的pH值。[35] 实际上，海洋不会变成真正的酸性（即pH值低于0.7），酸化一词是指海洋在向酸性方向变化的过程。

海洋酸度增加的主要后果是减少了海洋动物可以使用的碳酸盐的数量。海洋中碳酸盐的最重要的用途之一是生成碳酸钙或者石灰岩结构，如巨蚌，珊瑚，贝壳，珍珠，以及一些海洋浮游生物的壳。海洋酸化将严重影响这些生物生成它们碳酸钙结构保护层的能力，并可能会破坏海洋的一些最重要的化学和生物学功能。[36]

© OCEANA / Houssine Kaddachi

什么是海洋酸化？

海洋对二氧化碳的吸收减缓了气候变化对地球生命变化的影响。自从工业革命以来，海洋一直像一个二氧化碳排放的“碳储存槽”，减小了气候变化的程度。如果没有海洋所起的这个作用，二氧化碳在大气中的浓度在过去的250年里将额外增加百分之五十五。[37]

在工业革命以前，海洋与大气之间的二氧化碳交换是相对平衡的，每年海洋所吸收的二氧化碳和它的释放量（21.5亿吨二氧化碳）是基本相同的。[38] 可是，大气中的二氧化碳浓度已经增加（主要是由于燃烧矿物燃料所造成的），因此，海洋吸收的二氧化碳数量也有所增加。只要海洋表面的二氧化碳浓度小于大气中的二氧化碳浓度，海洋将继续吸收来自大气的二氧化碳。[39]

海洋表面的pH值已经下降了0.1个单位，这表示它的酸度增加了百分之三十。[40] 如果当前的排放量的趋势继续下去，到本世纪末，pH值可能再降0.3个单位，从而酸度几乎要再增加一倍。[41] pH值的尺度可能会引起误解，因为它是对数形式的。pH值表面看起来很小的增量，实际上表示了很大的酸度变化。例如，pH值看起来只有0.4单位的很小下降，却代表了海洋中的酸度增加超过一倍以上（几乎增加百分之一百五十）。[42] 在过去的3亿多年，海洋的pH值从来没有下降到低于1750年的水平0.6个单位以上。[43] 可是，在未来几个世纪，如果我们继续使用矿物燃料而有增无减，海洋的pH值就可能下降到比1750年的水平低0.7个单位以上。[44]

对地球上人为的二氧化碳排放来说，海洋是最大的仓库，或者“碳储存槽”。[46] 自从工业革命以来，海洋已吸收超过4600亿吨的二氧化碳，[47] 这几乎是由矿物燃料燃烧造成的二氧化碳排放量的一半，或者是所有由人类造成的二氧化碳排放量的百分之三十。[48] 目前，海洋每天吸取大约3千万吨二氧化碳，[49] 接近美国的二氧化碳的日排放量的两倍。[50]

表 **1**，海洋 **pH**值现在和未来预计的变化 [45]

	自从工业革命以前的变化		pH 条件从来没有经历过的年代
	pH 单位	百分比	
目前	-0.1	30	800,000 年
一切照常在 2050	-0.2	60	20,000,000 年
一切照常在 2250	-0.7	210	300,000,000 年

表 **2**，在“一切照常”排放的情况下，过去和未来海洋表层水的化学性质 [56]

年	大气的二氧化碳浓度 (ppm)	海洋表面的 pH 值
1750	280	8.19
2008	385	8.09
2020	440	8.03
2040	510	7.97
2060	600	7.91
2080	700	7.85
2100	850	7.78

目前，在大气中的二氧化碳浓度已大大超过人类有文明史以来的任何时候。事实上，科学家们已经确认，远至80万年以来，二氧化碳的自然浓度从来没有超过百万分之三百。[51] 如果目前的趋势继续下去，到2050年，海洋的pH值将比过去两千万年以来的任何时候都要低。[52]

更为严重的是海洋化学性质正在变化的速度。目前的酸化率比过去几十万年的最高速度至少快100倍。[53,54] 二氧化碳被吸收得如此之快，以至于海洋表层水的缓冲能力都不能阻止海洋的pH值的大幅降低。[55]

地质史纪录表明，海洋表层水的二氧化碳浓度即使很微小的变化，都会对海洋钙质物种和海洋自然生物化学循环周期产生不良影响。[57,58] 远古世纪的几次大规模的物种灭绝和珊瑚礁消失（珊瑚礁从大规模物种灭绝中恢复的时间量级，大约需要几百万年）可能也要归咎于海洋酸化。[59] 发生在五千五百万年前的一次酸化事件，即古新世-始新世极热时期的气候异常温暖（PETM），造成了相当大比例的底栖海洋钙质物种的灭绝。[60] 我们目前的所作所为，等于或已经超过了PETM的酸化事件。倘若全部矿物燃料的资源都被开采，海洋将吸收与PETM事件数量相当的二氧化碳，但现在的排放速度要快得多（是几十年到数百年，而不是数千年）。因此，现在的海洋酸化的后果可能比PETM事件更具灾难性。这意味着另一次大规模的生物灭绝可能迫在眉睫。[61,62]

倘若目前的二氧化碳排放量的趋势持续下去，将导致珊瑚礁消失，也可能导致其它海洋物种的灭绝。[34]

—Ken Caldeira 博士

pH 值量度工作原理

化学家通过氢离子 (H+) 的浓度来确定酸碱度，并用pH值来表示。尺度从0（高浓度H+的强酸性溶液）到14（低浓度H+的强碱溶液）。例如，酸电池的pH值大约是0，而下水道的去污液，大约是14。中性溶液的pH值是7，原始海水的pH值在8到8.3之间。pH值每变化1个单位，代表了氢离子浓度，即酸度，增加10倍。例如，pH值5比pH值6的酸度强10倍，比pH值为7的酸度强100倍。

相对于蒸馏水的氢离子浓度 (pH)		实例溶液和它们的pH值
10,000,000	0	酸电池溶液
1,000,000	1	盐酸
100,000	2	柠檬汁，醋
10,000	3	桔子汁，苏打水
1,000	4	西红柿汁
100	5	黑咖啡，酸雨
10	6	尿液，唾液
1	7	纯净水
1/10	8	海水
1/100	9	小苏打，牙膏
1/1,000	10	镁奶
1/10,000	11	家用氨水
1/100,000	12	肥皂水
1/1,000,000	13	漂白剂，烤箱清洗剂
1/10,000,000	14	下水道去污液

来源 Richmond River 郡议会

海洋化学

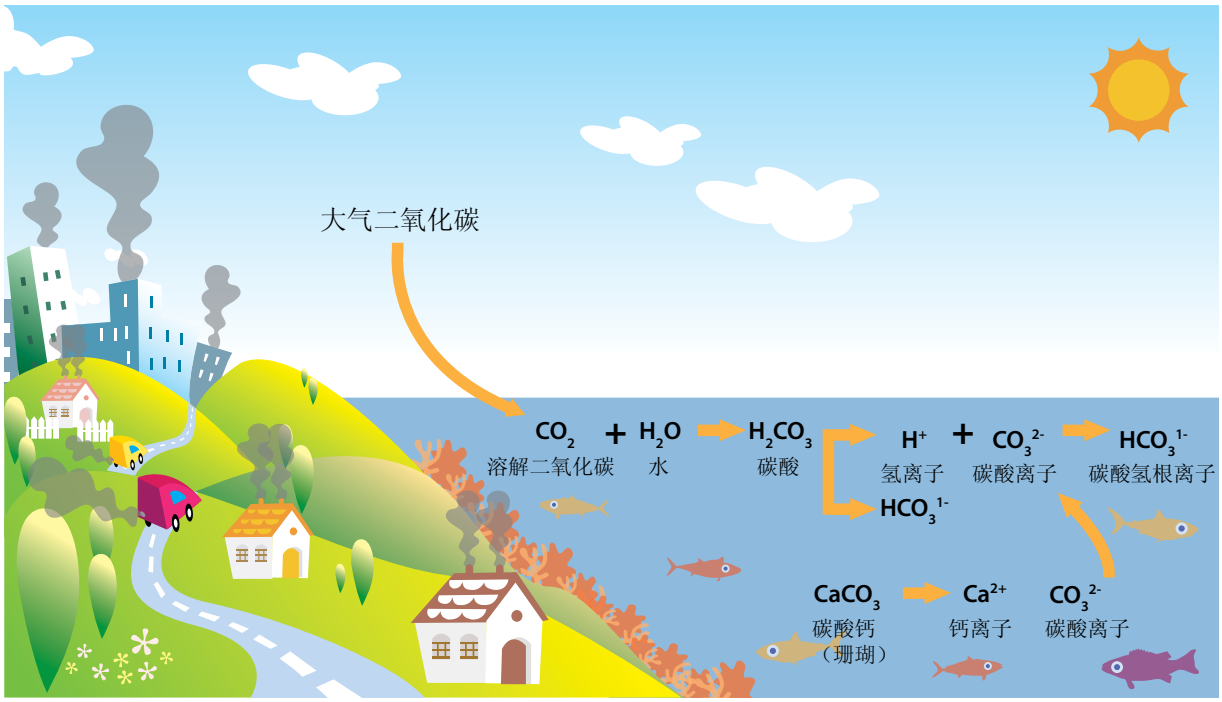
海水的化学成分减缓了pH值比较大的变化。然而，二氧化碳的大量增加减少了可用的碳酸盐，甚至使海水腐蚀碳酸钙结构。

海水中高浓度的二氧化碳降低了碳酸盐的可用性

水与从大气中吸收的二氧化碳反应生成碳酸氢根离子，在这个过程中，耗尽碳酸根离子。海洋中，碳酸盐和碳酸氢盐是相互均衡的，因此，一个的大量增加会导致另一个的大量减少。海洋动物需要碳酸来生成他们的碳酸钙贝壳和骨骼。在典型的批pH值的水平下，大部分海洋的无机碳以碳酸氢根离子的形式储存着，但仍有足够的碳酸盐用于形成碳酸钙。当海洋所吸收的二氧化碳与水反应，就形成了碳酸氢根离子和氢离子。然后，这个氢离子就与碳酸分子结合，否则碳酸就可以用于生成碳酸钙了。这提示我们，离开了碳酸根离子的系统平衡，会降低这一重要的分子的可用性，这对海洋生物来说是致命的。

一些海洋物种可能会受到碳酸根离子可用性减少的影响，它们包括：珊瑚，海星，牡蛎，蟹，虾，蚌，龙虾，颗石藻（一种浮游植物），翼足目软体动物（海蜗牛）和有孔虫（与变形虫有关的浮游生物）。

图 **1** 海洋酸化的化学过程



大气所吸收的二氧化碳与海水相结合生成碳酸。这种酸然后释放出一个碳酸氢根离子和一个氢离子。氢离子与水中的自由碳酸根离子结合形成另一个碳酸氢根离子。这个自由的碳酸盐本来可以提供给海洋动物用于生成它们的碳酸钙贝壳和骨骼。

海水变得具有腐蚀性

在一些已经被酸化的海域，碳酸盐显著地减少，以至于碳酸钙结构开始分解。由于碳酸钙结构只存在于碳酸根离子的可用性达到足够水平的水中，对于碳酸根离子浓度已经很低的海域来说，额外的氢离子将进一步减少碳酸盐的可用性，并且实际上能引起已经存在的碳酸钙结构开始分解。随着二氧化碳的积累达到一定程度，那些pH值已经低到足以腐蚀碳酸钙结构的海洋区域将扩大，并可能出现更多这样的海域。

实际上，正是氢离子的浓度决定了海洋的酸度，因此氢离子与碳酸根离子的结合，对于海洋日益增强的酸性来说，是一个缓冲的过程。但是，由于大量的二氧化碳正在被吸收，碳酸钙结构的分解成为海洋酸度返回其工业革命之前的水平的唯一途径。然而，这是一个缓慢的过程，需要数千年的时间才能完成。同时，它目前正在被涌入的二氧化碳所超过，[63] 并且许多极为重要的碳酸钙结构，如珊瑚礁和贝壳类的生物，可能开始分解了。

这个 **Oculina patagonica** 的骨架，在地中海地区被发现的硬珊瑚，处在酸化水域中6个月之后被完全分解。只留下息肉一样的软海葵 。

Photo: A. Briestien

方解石和文石的作用

虽然碳酸钙分解主要是由碳酸盐离子的可用性引发的，它同样也受到其他因素影响，如碳酸钙的化学结构。碳酸钙一般有两种形式：方解石和文石。生物体通常会制造其中的一种或者另一种形式，有些还将镁添加到它们的方解石结构。文石和含镁方解石比方解石更容易分解至少百分之五十，因此受到酸性增加影响的伤害更大。[64] 由于对酸性的条件更敏感，生物体，例如用文石构建自己的骨骼和外壳的珊瑚和翼足目软体动物，以及产生含镁方解石的珊瑚藻尤其容易受到海洋酸化的威胁。[65]

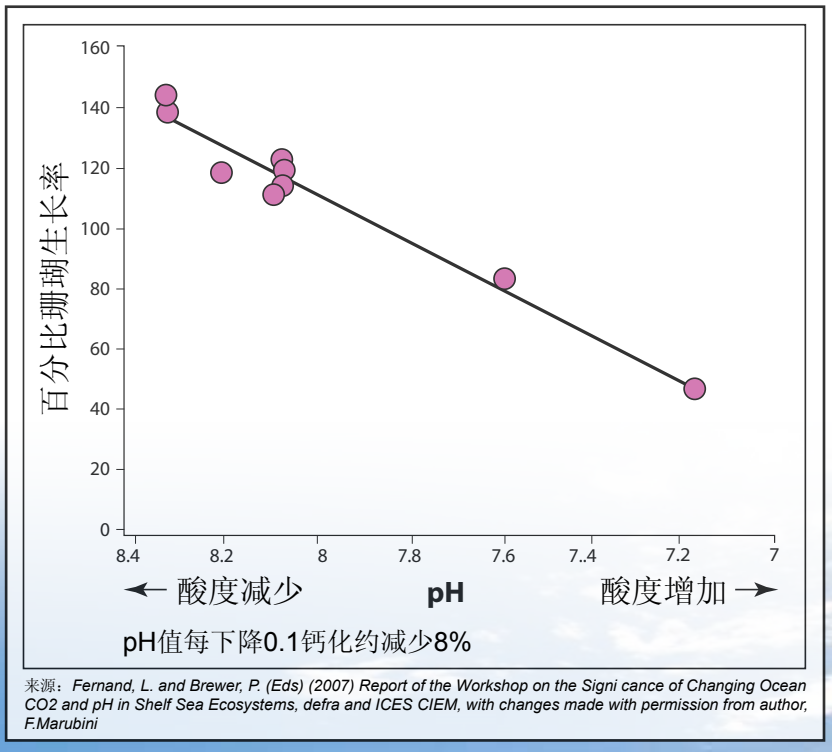
钙化在很大程度上取决于周围的水的“饱和状态”。这也取决于其它多种因素，包括水的温度和压力。[66] 目前，海洋的近表层水对于一切形式的碳酸钙来说是处于“过饱和”的状态（即碳酸盐离子浓度是如此之高，碳酸钙很容易制造），因此表层海水是海洋中与碳酸钙最“友好”的区域。[67] 冷的深层海水可以保持更高水平的二氧化碳，因此与温暖的表层水相比，那里自然会有更高的酸性以及与碳酸钙“非友好”的关系。在pH值较高，并且水中碳酸根离子“饱和”时，钙化率（对动物制造碳酸钙结构能力的一种量度），就会比较高。当饱和度下降时，类似于较深水中情况，这些物种的生长率会下降（见图2）。[68] 一旦达到“非饱和”的程度，碳酸钙将开始溶解。但是，在“非饱和”形成以前，钙化率可能很早就开始下降。因此，有些钙化体在非饱和点达到之前，可能已经无法存活。[69]

随着更多的二氧化碳进入海洋，文石和方解石的饱和线（饱和水和非饱和水之间的界线）向趋于海面方向彼此靠近，从而钙化可以发生的区域缩小了。[70] 海洋所吸收的二氧化碳的数量已经使饱和线与工业革命之前相比，向趋于海表面的方向升高了**50**至**200**米。[71]

南大洋，由于它的冷水，拥有世界上所有海洋中最低的碳酸盐浓度，是不适宜碳酸钙结构存在的海域，即使在接近海表面也是如此。[72] 结果，随着二氧化碳含量增加，南大洋的钙质生物处于最危险的境地。

如果我们继续按照目前的速度燃烧矿物燃料，到本世纪中叶和末期，整个南大洋可能成为文石的非饱和区域。[73] 当大气中二氧化碳浓度达到的百万分之四百五十，百分之七的南大洋，低于南纬60度的海域，将处于对于文石非饱和的状态。[74] 当二氧化碳浓度达到百万分之五百六十，文石的非饱和区将扩散到遍及极地海洋，次极地南大洋和次极北太平洋的部分区域，[75] 使文石结构几乎不可能存在于这些地区。这对于冷水珊瑚，翼足目软体动物以及其它采用文石和含镁方解石来生成甲壳和骨架的海洋生物来说，将是灭顶之灾。

图**2**：热带珊瑚钙化（增长率）随着酸度增加的减少

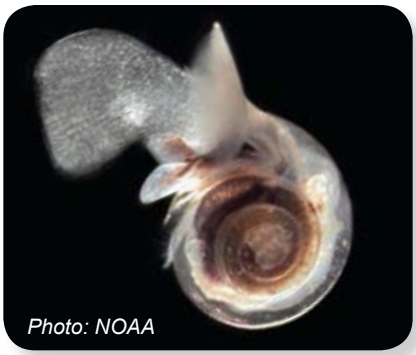


来源：*Fernand, L. and Brewer, P. (Eds) (2007) Report of the Workshop on the Signi cance of Changing Ocean CO2 and pH in Shelf Sea Ecosystems, defra and ICES CIEM, with changes made with permission from author, F.Marubini*

Photo: Ted Dintersmith

海洋酸化的影响

许多生物的生物和生理过程将受到日益增长的酸性环境的挑战，[76] 接着，将导致许多海洋生态系统的改变。据英国皇家学会关于海洋酸化的报告，这些对生态系统的影响可能将是严重并且持久的。



正在游泳的翼足软体动物 **(Limacina helicina)**

钙化过程

钙质物种遍及各个大洋的浅海，深海和开阔水域的生态系统。钙化是生物使用碳酸钙生成自己结构，如甲壳和骨骼，的生理过程，有些钙质生物制造大型结构，如珊瑚礁，而另一些则是极其微小，例如颗石藻壳，只能用显微镜观察。钙质有机体包括海洋中最丰富最重要的一些物种，例如，浅水和深水珊瑚，蛤，牡蛎，翼足目以及其它软体动物，甲壳类，包括龙虾和螃蟹，棘皮动物，如海星，甚至部分种类的浮游植物。[77, 78]

这些生物采用周围海水中的钙 (Ca^{2+}) 和碳酸盐 (CO_3^{2-}) 离子来生成它们的碳酸钙结构。钙离子通常在整个海洋都很丰富，所以它们不是生长的限制因素。但是，碳酸离子可用性却是多变和稀缺的，因而能限制钙化过程。[79] 如前所述，二氧化碳含量的增加导致了碳酸盐离子的减少，从而可以减慢或使钙化完全停止。[80, 81]

海洋生物在其生命的不同阶段，因为各种原因而生成它们的碳酸钙结构。例如，珊瑚不仅生成碳酸钙骨骼来作为一个保护巢，而且可以使它的息肉面向光，并处于流动的海水。这使它们更容易取得的光，养分和矿物质，以满足生长的需要。[82] 也有人提出，生命的某些阶段，如生殖成熟期，是由钙化能力引发的。珊瑚，例如 **Goniastrea aspera**，的生殖成熟是当动物生长到一定尺寸而达到的，这取决于它的钙化能力。[83] 倘若许多生物失去钙化能力，就可能影响到他们的健康和生存。[84] 这可能引发整个海洋生态系统和食物链的严重副作用。

牡蛎和珍珠

斑龙虾（龙虾鳟） **(Panulirus guttatus)**

皮肤光滑的红海星 **(Hacelia attenuata)**

热带珊瑚

若二氧化碳含量在目前的水平之上增加百分之二十，这可能发生在未来20年，将显著减弱珊瑚生成自己的骨骼的能力，在这同一时间内，它们的一部分可能功能性地灭绝。[86] Ken Caldeira博士指出：

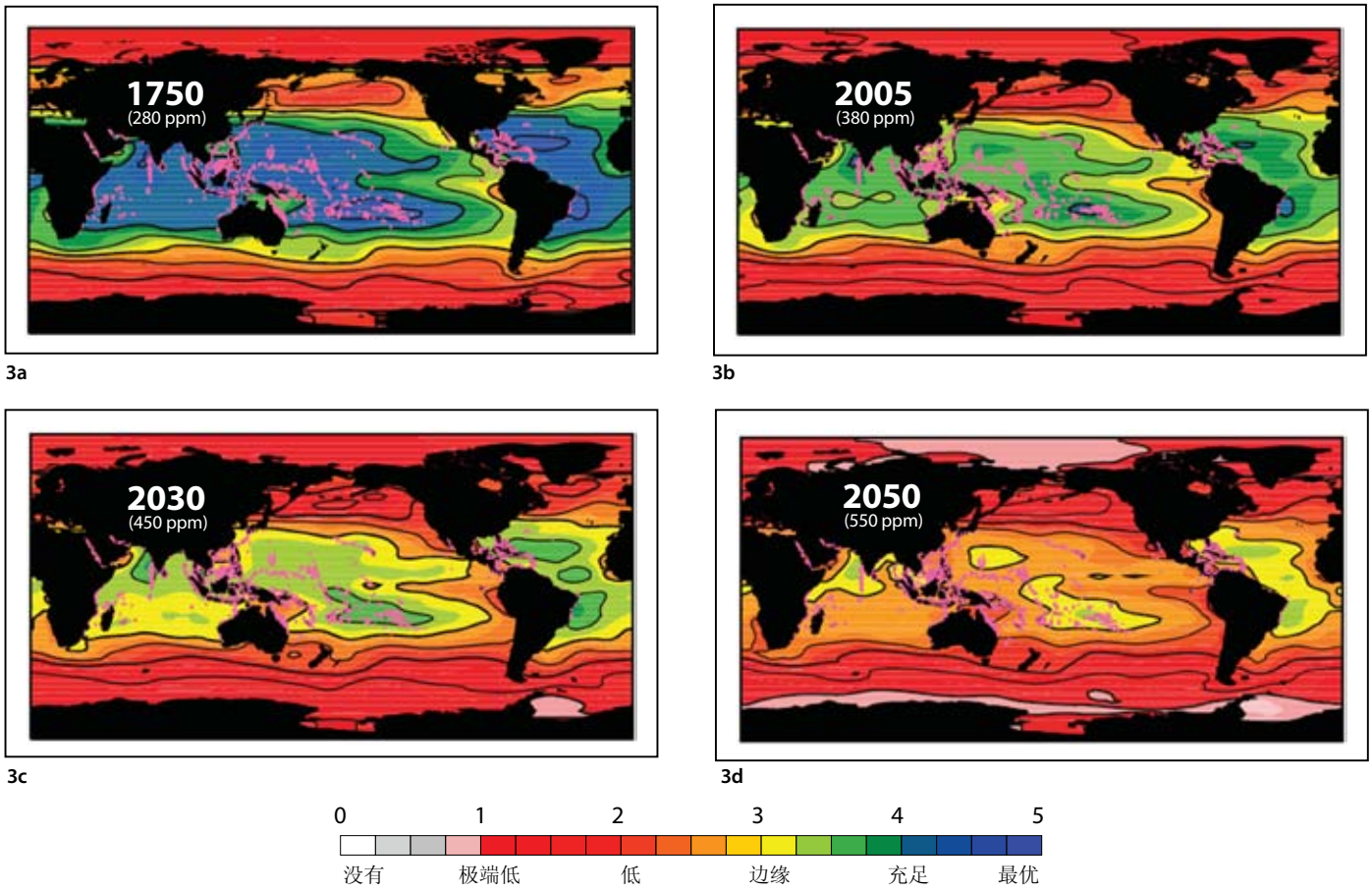
> “至少可以这样合理地预言，如果目前的二氧化碳排放量的趋势继续下去，本世纪珊瑚将难以逃脱灭绝的命运。”[87]

通过浅水珊瑚实验发现，二氧化碳浓度百万分之五百六十时（两倍于工业化前的水平）将减少钙化高达百分之六十六。[88] 如果从现在起一切排放照常进行下去，可以预期大约在本世纪中叶，大气中的二氧化碳就可能达这个水平。

实际上，这并不仅仅意味着珊瑚生长更加缓慢，也说明他们将没有能力克服典型的压力。珊瑚礁一直在斗争中成长。实际上，许多寄居在珊瑚礁的生物将珊瑚的骨骼断成碎片，要么吃掉，要么用来建巢。这一过程称为生物侵蚀。即使是最健康的珊瑚礁，也一直不断在试图使其增长速度超过被侵蚀的速度.[89] 在高二氧化碳浓度的环境中，不仅珊瑚生长得更慢，也不太坚硬，因而所生产的骨骼比较软弱。[90] 因此，处于更强的酸性条件下的珊瑚礁，可能无法抵御这个典型数量的破坏，并可能比预计要早得多地开始萎缩。

工业革命之前，约**98%**的珊瑚礁处于充分或最优的文石饱和状态的水域，然而，这已经随着迅速增加的海洋酸化而改变。如今的二氧化碳浓度，已经使**60%**的珊瑚礁处于非充分饱和的水中，而如果二氧化碳浓度的增加到百万分之四百五十，超过**90%**的珊瑚礁被同样的水所包围。如果二氧化碳的浓度可以达到百万分之五百五十，现在将没有珊瑚礁周围的海域处于足够饱和状态。[91]

图**3:** 海洋的文石饱和状态和足够珊瑚生长所需的量



资料来源：摘自：*Adapted from: Cao L., & Caldeira K (2008)* 大气中二氧化碳的稳定性和海洋酸化。地球物理研究通报，付印中，已由作者许可。

事实上，当大气的二氧化碳浓度达到百万分之五百六十时，所产生的海洋条件对珊瑚来说将是如此的荒凉，以至于几乎所有的现在珊瑚所生长的海域将处于文石非饱和状态，并引起了珊瑚礁分解。[92] 然而，实际上珊瑚的钙化，在我们达到百万分之五百六十之前就可能结束。因为一旦二氧化碳浓度达到百万分之四百八十，文石结构就可能被酸化的海水侵蚀（见表3）。[93] 如果一切排放照常下去，到2040年，很可能只有极少数非常小的海域仍保持有利于珊瑚生长的最佳状态，而到本世纪末将没有任何足够生存的条件存在。[94] 正因为如此，科学家们建议，在大气中的二氧化碳浓度应当稳定在百万分之三百五十或以下，以维持我们现在已知的以珊瑚为主的生态系统。[95]

表3: 珊瑚礁毁灭已经开始并将随着二氧化碳浓度的增加恶化
翼足目软体动物的壳在酸化水中溶解 [96]

二氧化碳浓度 (ppm)	珊瑚礁条件
380	由于海洋酸化珊瑚礁将改变，但珊瑚仍将保持主导位置。
450	密度和对珊瑚礁的珊瑚多样性将下降，其中包括与珊瑚有关的鱼类和无脊椎动物的损失。
450-500	珊瑚礁将有可能成为“迅速被侵蚀成碎片的海岸”。这可以看作是对珊瑚的一个转折点，超越该临界点，据我们所知，珊瑚礁将变得极其罕见，如果不是被完全毁灭。将需要数百万年，珊瑚礁才能回到它们先前的多样性和密度。

珊瑚礁的损失将意味着数百万的物种失去它们的栖息地和供应服务。珊瑚礁为不同的生物提供，育婴场，觅食和产卵地，这是世界上其他任何地方都没有的。不幸的是，由于海洋酸化和气候变化的威胁，珊瑚礁族群将变得远远低于其正常的数量。[97] 没有珊瑚礁，将对多达九百万的物种（包括四千种鱼类）造成严重后果，它们依靠珊瑚礁作为栖息地和提供营养。[98]

海洋的化学性质的变化如此之快，以至于珊瑚将不可能适应这些新的状态。[99] 自1980年以来，世界上已有近百分之三十热带珊瑚湮灭，主要是由于海洋变暖。[100] 如果珊瑚礁继续以这个速度消失，那么在本世纪中叶到本世纪末，将没有任何暖水珊瑚存在。[101]

冷水珊瑚

虽然热带珊瑚可能是世界海洋中最著名，最被广泛喜爱的钙质物种，它们并不是唯一受到海洋酸化强烈打击的珊瑚类型。对于人为的二氧化碳排放来说，冷水或深海钙化珊瑚可能是最脆弱的海洋生态系统。[102]

虽然我们知道冷水珊瑚的存在已经超过了两百年，我们现在所知道的，大部分是在过去的几十年所了解的。[103] 在冷水中，珊瑚形成的礁石有着极其高的生物多样性，为许多深海生物提供栖息地和育婴场，其中包括一些具有重要商业价值的鱼类。[104] 还有许多我们仍然不知道的一些生物，但是按照目前的海洋酸化速度，也许在我们能完全欣赏它们真正的美丽和重要性之前，它们就已经消失了。[105]

冷水珊瑚，海绵和相关的生态系统已被确认为是新的治疗疾病的重要资源，这些疾病包括癌症，关节炎，老年痴呆症和各种皮肤病。[106] 例如，竹珊瑚，一种海扇，已被用于合成模拟人骨用于接骨，并可能为人工合成胶原蛋白提供了范例。[107]

有六个冷水的，造礁的，石珊瑚物种，它们用文石生成其碳酸钙骨架。[108] 作为地球上生长最慢的这部分珊瑚，酸化对它们构成了真正的和最直接的威胁。[109]

石溪冷水珊瑚， 例如 **Lophelia**，依靠自己坚硬的骨骼来支持他们的息肉，使他们能够从周围的水中捕捉食物和养分。

深层海水与珊瑚海绵为螃蟹以及其他许多物种提供了重要的栖息地。

冷水珊瑚分布在世界各个海洋，有些在海面以下五千五百米以上的深处。冷水珊瑚生活在寒冷，常常是深水处，一般不利于钙化。[110] 生成文石骨架的冷水珊瑚的最大深度似乎与文石饱和线相匹配。[111] 虽然，造礁珊瑚的部分物种分布在北太平洋，它们所造的不能算珊瑚礁，这可能是因为在这区域文石饱和线的深度比较浅。[112] 当文石饱和的状态继续减少，可能会在影响浅水造礁的珊瑚之前，影响冷水珊瑚。[113, 114] 冷水珊瑚可能有如此缓慢的生长和钙化率，至少部分是，因为它们生存在比较低的文石环境。[115]

文石饱和的状态可能会减少到足够低，以至于在十年或者更短的时间内，低到难以支持最深的冷水珊瑚。[116, 117] 假如，冷水珊瑚以浅水珊瑚相同的方式对降低了的pH值做出反应，那么在**2020**年之前，它们可能将面临着生长率的显着减少。[118] 到**2040**年，所有的我们所已知存在的冷水珊瑚，可能处在勉强生存的边缘或者更糟，[119] 而在本世纪末，至少有三分之二的冷水珊瑚礁可能将处于腐蚀文石的水中。[120] 在本世纪末之前，如果我们继续以目前的水平排放二氧化碳，很可能世界上绝大部分的海洋，对这些珊瑚来说将是“完全无法生存的”。[121, 122]

其他重要的钙质物种

并不是只有珊瑚正在受到海洋酸化的严重影响，并可能被消灭。例如，贝类，牡蛎，壳状珊瑚以及巨量的浮游藻类钙质物种也用碳酸钙生成它们的骨骼，甲壳和外皮。这些生物体有些可能是很微小的，但它们在海洋以及海洋食物链中扮演非常重要的角色。[123]

壳状珊瑚藻

壳状珊瑚藻是珊瑚礁的初级钙质生物，对于珊瑚礁的生长和稳定起着重要作用，对珊瑚礁的沉积物有重大贡献，并且是海胆，鹦嘴鱼和贝类的几个种群的重要的食物来源。[124, 125] 最近的一项研究发现，在酸化水域壳状藻类的生长量减少了百分之八十六。[126] 这些藻类用含镁方解石生成他们的骨骼，因此可能在珊瑚礁中，是第一批受到酸化影响的生物体。[127] 钙化和成长的能力减弱可能会严重影响珊瑚礁的稳定性和多样性。

翼足软体动物的壳在酸化的水中被分解

翼足目软体动物

翼足目软体动物，或游动的海蜗牛，是极地和亚极地最基本的食物链的一个不可分割的组成部分，在那里充当生态系统许多动物，包括鲸和其它食肉动物，的主要猎物。[128] 他们占了阿拉斯加粉红鲑鱼食物量多达百分之四十五。[129] 一些初步的研究表明，翼足目软体动物的生产量减少百分之十可能导致成熟粉红鲑鱼的体重减少百分之二十。[130] 由于他们的壳是由文石构成的，他们分布在更冷的高纬度区域，而那里是最早成为非饱和区域之一。[131] 因此，翼足目软体动物可能是酸化危害的第一批受害者。一系列的实验表明，在南大洋，活翼足目软体动物预计到2100年将暴露在文石非饱和水平之下。尽管动物本身仍然存活，但它们的壳再48小时内就开始分解。[132] 酸度增加可能导致翼足目软体动物钙化率降低，从而最基本的海洋食物链附近可能产生破裂，进而导致主要生态系统的重大变化和捕食者与猎物相互作用的去耦合。这可能最终甚至会影响到海洋中最大的顶级掠食者和许多商业性的渔业。[133]

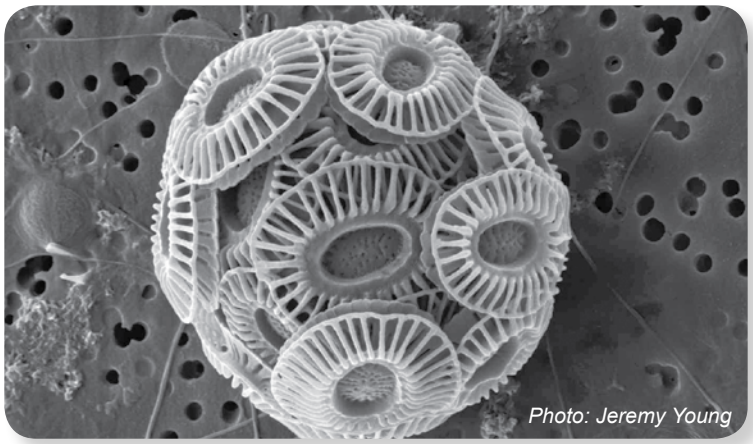
颗石藻

颗石藻是由方解石层包裹着的单细胞藻类。根据研究已经发现，某些物种当暴露在酸性水域的时候，钙化会减弱，而另一些则没有。一个物种在较高二氧化碳的条件下，钙化率实际上增加了。[134] 可是，甚至颗石藻的一些物种钙化的减少可能加剧气候变化。颗石藻产生大量藻类繁殖，因为它们白垩的外皮，所以比周围的水的颜色要浅。这就增加了反射回大气中的日照量，而不是被海洋吸收。如果没有这些浅色的壳反射太阳光，地球的反照率（反射率）可减少**0.13%**。[135] 这样，颗石藻钙化的减少，实际上促进了气候变化。

颗石藻还生产二甲基硫 **(DMS)** 的，它在大气中发生反应能激发云的生成发展。颗石藻所生产的**DMS**很可能受到海洋酸化的破坏。这可能大大减少大气中的**DMS**浓度，减少海洋上空的将太阳光反射回太空的云量，并导致地球的进一步变暖。[136, 137] **DMS**的减少也可能对生态系统有广泛的影响，因为这个化合物被许多动物作为寻找觅食地的导航信号，例如海鸟，[138] 珊瑚鱼 [139] 和海豹 。[140] **DMS**的减少可能破坏这些动物的喂养方式，并使这些动物丧失找到足够的食物能力。

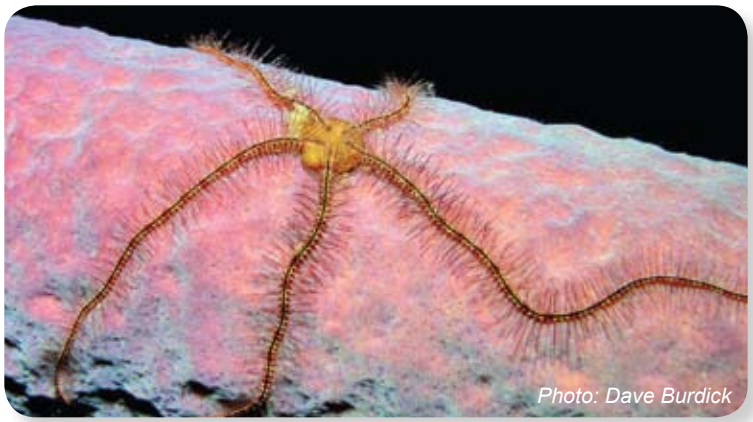
浮游钙质物种

许多物种在其幼虫阶段生产碳酸钙，因此，海洋酸化的增加也会影响那些在成年时可能不受影响的物种。以两个海胆幼虫为例，表明暴露在增加的二氧化碳之中，它们的钙化明显减少，发育率减低。[141] 其他物种，如贻贝，牡蛎，海星，蛇尾星和甲壳类动物，二氧化碳浓度升高的条件下，也呈现在幼虫期钙化率下跌。[142, 143] 早期发育和海洋生物的生命历程受到破坏，可能会显著降低它们的健康和生存能力，从而为海洋生态系统带来潜在的严重后果。



颗石藻将自己环绕在一层非常薄的碳酸钙片，所谓的壳皮。

大规模，浅色颗石花朵将光反射回太空，并有冷却效果。



在高二氧化碳条件下，显示出蛇尾在幼虫阶段钙化下降。

对海洋生物的生理影响

随着在钙化能力下降，许多其他生物和生理过程将受到海洋酸化的破坏。[144] 这些影响可能包括生长速度减慢，[145] 繁殖减少 [146] 和抗疾病能力减弱。[147, 148] 所有这些都会对食物链和生态系统产生波纹扩散效应。[149] 基本生理功能，如呼吸系统和神经系统的功能，同样也会遭到海洋酸化的破坏。[150] 另外，海洋酸化还可能会导致某些物种行为的改变。[151]

紫海胆
(*Heliocidaris erythrogramma*)

对繁殖的影响

幼虫和半成虫往往对酸度的增加最敏感。例如，两种海胆 **(Hemicentrotus pulcherrimus** 和 **Echirometra mathaei)** 的卵受精率，随海洋酸化的增加而下降。由于二氧化碳的增加，还可能造成他们的骨骼畸形。[152] 如果目前的二氧化碳照常排放，直到**2100**年的酸化水平，将使另一类海胆，**Heliocidaris erythrogramma**，的受精成功率减少百分之二十五。[153] 高二氧化碳含量还对生殖造成许多其它影响，包括在太平洋牡蛎精子活力下降，一种海蜗牛，（斑东风螺）幼体人数减少，以及桡足类产卵的数量下降。[154, 155, 156] 如果海洋酸化影响到繁殖，接着生物族群的规模将可能减少。[157]

鱿鱼
(Sepioteuthis sp.)

对呼吸的影响

海洋酸化与气候变化结合在一起，可能会导致许多海洋生物的供氧危机。随着海洋的变暖，他们的含氧量减少，较高浓度的二氧化碳和低氧结合在一起，可能会导致一些物种的氧传输机制（如人体内的血红蛋白）与二氧化碳的结合比与氧结合更容易，从使动物呼吸困难。[158] 鱿鱼对供氧危机特别敏感，因为它们需要的高浓度氧来支持它的需要高能量的游动方式。[159] 没有充分游动能力，将对健康和生存能力产生严重后果。处于供氧危机的许多生物体的新陈代谢功能可能会改变，因为他们会试图去适应周围新的酸度水平。[160] 虽然，这并至于直接毁灭个体本身，但这会影响的生长和繁殖率，从而可能危害种群的数量和规模。[161]

普通长春花
(Littorina littorea)

对行为的影响

随着酸度的增加，给某些物种的生理和生物过程带来变化，由此引起它们的行为变化以补偿退化的功能。例如，最近的一项研究显示，普通的长春花 **(Littorina littorea)** 增加了它的回避行为，以应对在高二氧化碳条件下螃蟹的出现。[162] 正常的情况下，当遭遇的蟹类时，这类生物会依赖于它们加厚的碳酸钙壳。但是，当高酸度水平无法使海螺的壳增厚时，它们只得增加回避行为来补偿。[163] 虽然很难预测这些行为的变化可能产生的影响，但可以明确地说，这将损害生物本身健康，因为现在它们要花更多的时间去避免食肉动物的袭击，从而影响到它们的觅食和其它重要任务的执行。这也同样会对食肉动物和生态系统产生其他无法预见的后果。

当碳酸匮乏时，有些生物会减少重要活动以保持钙化。例如，一种海蛇尾，**Amphiura filiformis**，会减少洞穴的通风时间去喂养自己，以便集中使它失去的手臂获得再生。处在越酸化的水域，海蛇尾手臂的肌肉就越少，因为它们肌肉质量被转化为能量。[164] 在这种情况下，海洋酸化促使这些动物提高其钙化率，以应对碳酸根离子可用性的减少。但是，这些行为是有代价的，代价之一很可能是减弱生物的体能和生存能力。

对生态系统的影响

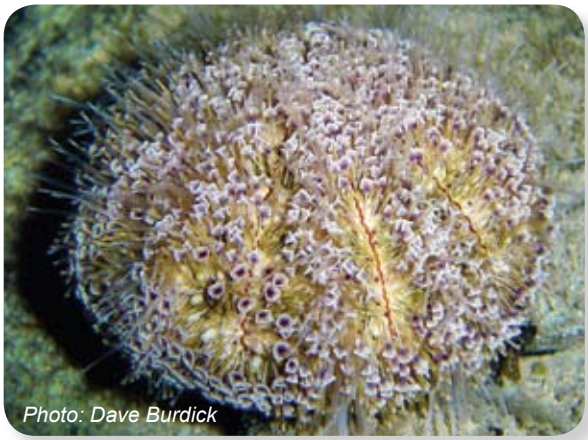
目前还不清楚酸化将如何影响生物族群的结构和生态系统的功能，但正如英国皇家学会的一份报告中指出：

> “如果不采取重大的行动，以减少向大气层排放的二氧化碳，这可能意味着在未来的海洋里，许多我们今天所知道的物种和生态系统，再也不会有一席之地。”[165]

浮游钙质物种的减少，可能会导致生物族群内部的物种组成产生混乱，这有可能波及整个食品链。[166] 浮游钙质物种是海洋中许多食物链的重要最基础的组成部分。如果这些物种的变化，变得缺少营养，或由于海洋酸化的影响而消失，那些依赖于它们的物种，包括鲸鱼，海龟，以及其它商业性鱼类，将苦于缺乏足够的猎物。这可能导致遍及整个海洋的生物体之间相互作用的巨大变化。

即使某些物种的成年体更能耐受海洋酸化的影响，其幼虫和半成虫对海洋酸化的高度敏感性将对整个生物种群和生态系统的结构产生重大影响。[167] 海洋酸化对不同物种的影响不同，有很多是酸化增加所产生的长期影响。[168] 即使一些物种没有直接受到生物或生理上的影响，也会有可能受到食物链和生态系统结构变化的不利影响。

Photo: NOAA/ David Burdick



毒海胆 **(Toxopneustes pileolus)**

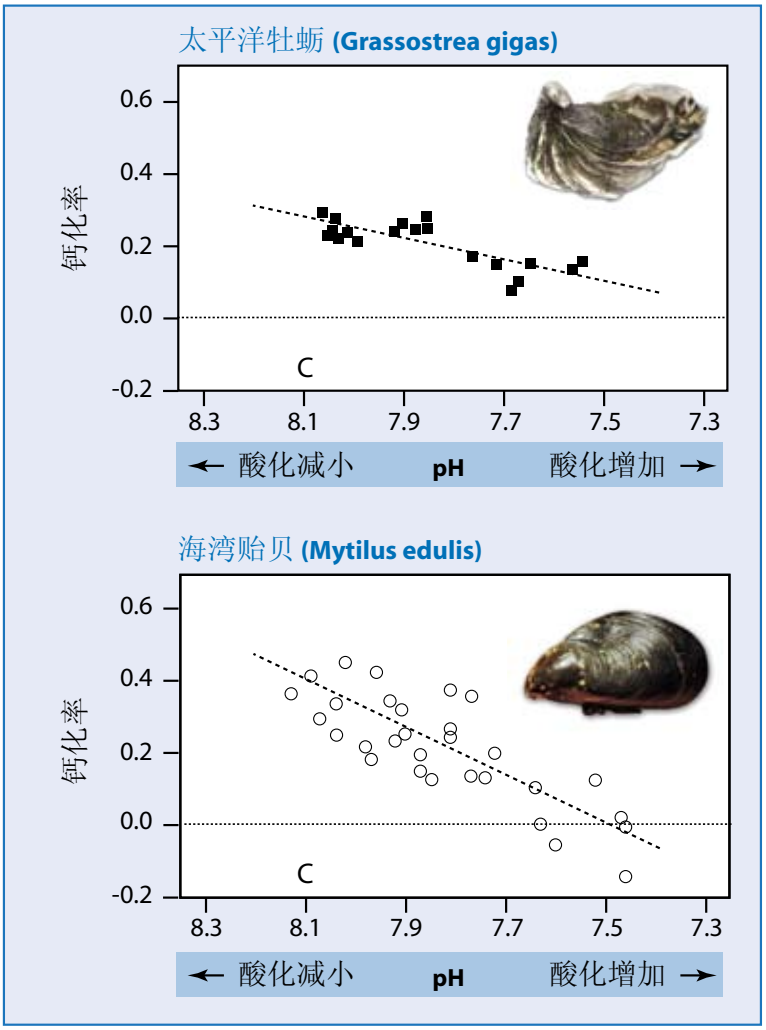
牡蛎 **(Crassostrea gigas)**

淡菜 **(Mytilus edulis)**

许多钙质物种在生态系统中起着重要作用，如海星充当关键捕食者，通过喂养生物族群中即将在竞争中出局的物种，使族群的多样化获得平衡。其他例子包括，海胆是重要的食草动物，而牡蛎和贻贝则是很重要的生态系统工程师，因为它们可以创建或修改自己的住所。

随着二氧化碳水平的提高，太平洋牡蛎 **(Crassostrea gigas)** 和海湾贻贝 **(Mytilus edulis)** 的钙化率线性下降（见图4）。[169] 如果大气中二氧化碳浓度达到百万分之七百四十，这可能在2100年之前发生，这些物种的钙化率预计将分别下降百分之十和二十五。[170] 牡蛎和贻贝的减少所造成的损失将是极其严重的，因为它们对于其生活在的生态系统是非常重要的，同时它们在全球水产养殖的产量中也占有很大比例。[171]

图**4:** 酸化增加使钙化率降低



Source: Adapted from Gazeau, Frederic et al. (2007) Impact of Elevated CO2 on Shellfish Calcification, Geophysical Research Letters, 34 , with changes made by permission from author.

牡蛎为其它底栖生物的提供重要的栖息地，并帮助控制沿海生态系统流动的营养和能量。[172] 它们是滤食性动物，这意味着它们从其生活的水中提取食物。这就作出了一个额外的贡献，过滤剩余的浮游植物，以及其所带的可能危害周围海水的化学和其他污染物。如果酸化导致了这些重要物种的减少，航道将迅速变得污染和不安全，而且沿海的生物多样性和生态系统的功能也将出现重大变化。

海洋贝类为小型无脊椎动物提供栖息地，增强沉积物稳定性，也成为许多物种的一个重要的食物来源，包括海鸟和人类。[173] 酸化的增加预计将减少贻贝的钙化，[174] 降低其代谢的活性 [175] 和生长率，[176] 甚至抑制其免疫功能。[177] 如果这些物种和其他类似的物种对生态系统所提供服务，受到酸度水平上升的严重影响，如果失去了这些物种所提供的利益，对于依赖于它们的野生动物和人类来说，都将是灾难性的。

Maxima clam
(Tridacna maxima)

Photo: © Christoph Specjalski

海洋酸化对人类的影响

海洋不仅控制着部分最重要的地球化学循环，使地球成为适宜居住的星球，它也可以为数十亿的人提供食品，生活，娱乐和休闲的场所。不幸的是，海洋酸化可能完全改变我们今天的海洋。失去生物多样化和活力的海洋可能以不同的方式对我们今天的生活产生负面影响。

例如，超过一亿的人在经济上依赖于珊瑚礁，还有更多的是依赖于珊瑚礁的保护，资源和娱乐。[178] 珊瑚礁的消失可能造成每年数十亿美元的损失，因为珊瑚礁为全球经济每年贡献约300亿美元，主要是在沿海保护，旅游，渔业和其他许多商品和服务行业。[179] 许多重要的以食鱼为主的生物物种，以生存在珊瑚礁生态系统的鱼作为重要蛋白质来源，[180] 如果这些鱼消失了，可能对那些物种的造成严重的健康和食物安全问题。

海岸保护

全球的许多沿海区域都靠珊瑚礁来抵御风暴潮，海啸和海岸侵蚀。[181] 2004年12月的海啸，使缺少坚硬珊瑚礁的海岸区域的生命财产和基础设施，蒙受了巨大损失，而珊瑚礁发育完好的沿岸区域则损失较小。[182, 183] 由普林斯顿大学的研究人员研发的科学模型证明，具有健康珊瑚礁的海岸抵御海啸的能力，至少两倍于那些珊瑚礁已经死亡的海岸。[184] 由于海洋的酸化导致的珊瑚礁消失，可能对许多沿海区域的健康，安全和福祉构成更大威胁。

旅游

沿海区域也遭受到由珊瑚礁退化所造成的重大的经济损失。由于珊瑚礁的状况下降，与其相关的生态系统的多样化也减少，很多游客会发现新的，受影响较小的地方去消费。这就意味着以旅游业作为其主要收入沿海区域，将蒙受损失。仅在夏威夷沿岸的珊瑚礁，估计每年可以产生三亿六千四百万的净营业收入。[185] 这一收入的损失可能会严重打击夏威夷的经济。

Photo: E. Harrould-Kolieb

渔业

2004年，全球捕捞了大约八千五百五十万吨海洋鱼类，价值七百六十四亿美元。[186] 虽然酸度增加对鱼类和贝类的数量造成的影响是难以准确估计的，但几乎可以肯定地说，将会有许多不利的影响。

由于酸化的影响，热带珊瑚礁开始消失，许多主要栖息在珊瑚礁的重要经济鱼类也处于危险之中，因为它们依赖于珊瑚礁提供的住所和食物。[187] 已经有一些鱼类在在珊瑚礁漂白事件中从珊瑚礁消失的例子。1998年，在冲绳珊瑚礁漂白事件发生后，橙斑尖吻鲀 (Oxymonacanthus longirostris) 因没有活珊瑚礁而无法生存。[188] 虽然这些尖吻鲀商业价值不是特别重要，但它提供了一个例子，使我们知道，如果酸化继续恶化，重要的鱼类种群会发生怎样的恶果。

深海珊瑚礁，与浅水珊瑚礁相对应，是生物多样性的热点区域，为许多物种提供重要的栖息地，其中包括许多有重要经济价值的鱼类如石斑鱼。[189, 190] 美国总渔业（每年超过40亿美元的行业）上市量一半以上是来自阿拉斯加水域。[191] 这一区域的许多有重要经济价值的生物物种，依赖于阿拉斯加，阿留申群岛的冷水珊瑚礁。[192] 在本世纪末之前，这些珊瑚可能会受到严重影响，甚至开始分解，这种情况无疑会损害从属于它们的鱼类的数量以及渔业。[193] 美国大西洋海岸的冷水珊瑚礁，同样形成了一个珊瑚，海绵，螃蟹，龙虾，海星和鱼类的真正的绿洲。

世界上许多商业性渔业可能受到海洋酸化直接或间接的威胁。直接威胁是由于酸度增加，使物种的生物和生理产生变化，而间接威胁是由于酸化增加，造成栖息地和捕获物的变化。在那里的许多区域，预计将在下个世纪将变成酸化程度最为严重的区域，而这些区域具有非常高的生产率，是世界上最重要的商业性渔业的支柱。[194]

海洋酸化对软体动物（如蛤，牡蛎和贻贝）和甲壳类动物（如龙虾，螃蟹，龙虾和虾）的影响，可以显示出对经济和生态系统双重的重大损失。在过去三十年，贝类养殖每年大约增加百分之八，2004年的市场价值超过九十八亿美元。[195] 甲壳类动物特别容易受到海洋酸化的危害，因为它们需要碳酸离子使蜕化后的新壳变硬。[196] 可食用的海湾贻贝 (Mytilus edulis) 和太平洋牡蛎 (Crassostrea gigas) 的钙化率已经被发现都随着酸度的增加而日益减少。[197] 2005年美国渔民甲壳类的捕获量超过三十三万吨，而软体动物类的捕获量超过八十七点七万吨。[198] 2005年美国从贝类的收入接近一千七百万美元。[199] 因此，由海洋酸化造成的这些种群数量的下降，可能会产生巨大的经济影响。

马眼鲹 **(Caranx latus)**

冷水珊瑚礁的园地

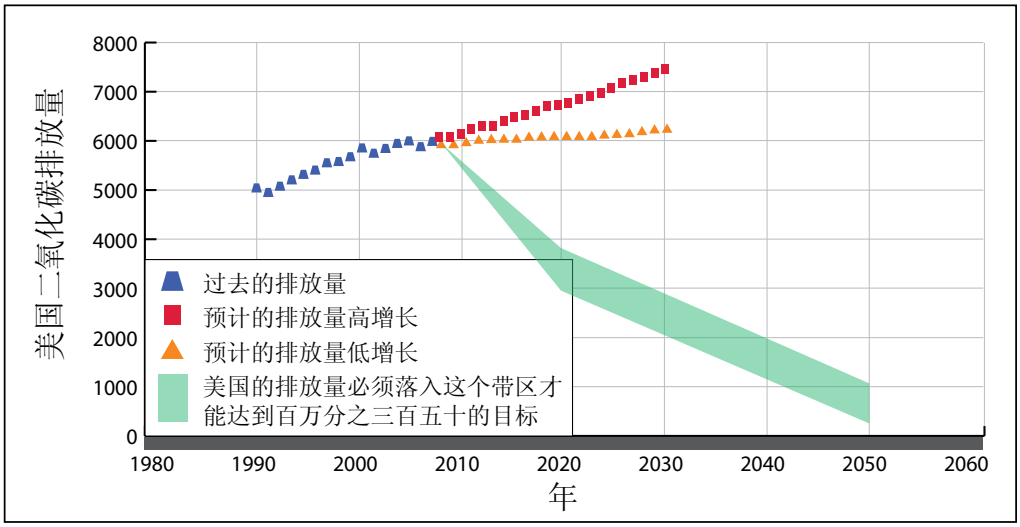
鸟尾蛤 **(Cerastoderma edule)**

珊瑚礁蜘蛛蟹 **(Mithrax spinosissimus)**

到达极限

“如果在2012年之前还没有采取行动，那就太迟了。我们在未来两至三年内的所作所为，将决定我们的未来。这是决定性的时刻。”
Rajendra Pachauri博士，科学家，经济学家和警监会主席 (2007)

预计美国的二氧化碳排放量与排放量为百万分之三百五十的图示



Source: Oceana, based on EIA (2008) and IPCC (2007)

目前大气中的二氧化碳浓度已经超出安全水平，因此我们可以看到整个海洋正在发生的重大变化，从大堡礁的珊瑚生长率持续下降，到在整个热带珊瑚大规模“漂白”事件。面对海洋酸化和气候变化的影响，珊瑚礁是十分脆弱的。它们为全部海洋物种的四分之一提供了重要的栖息地，因此，珊瑚礁对于许多人的生活和生计是极其重要的。放任珊瑚礁消失，会导致整个海洋发生难以承受的变化，也会对亿万人民的生活造成重大危害。目前，在珊瑚礁所发生一切，将预示着在整个世界，由于海洋酸化和气候变化可能导致的灾难性变化。

为了防止珊瑚礁消失，并最终避免气候变化的危机，我们必须将大气中的二氧化碳减少到低于百万分之三百五十。[200] 不幸的是，大气中的二氧化碳已经超出了这一安全水平，已达到百万分之三百八十五，并且仍然在继续攀升。[201] 目前的这个水平，除了太高以至于无法保护地球上的珊瑚礁，也远远高于人类的有文明史以来的任何时间。[202] 事实上，从科学家们目前所确定年代（八十万年）以来，自然界的二氧化碳浓度没有超出百万分之三百。[203]

如果我们继续保持目前的排放方式，排放量将远远超过百万分之三百五十的目标，从而我们不可能阻止珊瑚的灭绝。在今天的社会中，二氧化碳排放量直接关系到我们对能源的需求，而且需求越来越大。美国能源情报署 (EIA) 公布的最新数字表明，如果目前的排放方式一切照旧，同时现行法律和政策也保持不变，将导致全世界的能源消费到2030年将比2005年的水平增长百分之五十。[204] 这将导致人为的二氧化碳排放量稳步增加，到2030年，在大气中的二氧化碳浓度将超过百万分之五百七十。也就是说，在大气中的二氧化碳将高于2005年的百分之五十一以上。[205]

由于如此高的二氧化碳浓度，在未来几十年，海洋酸化将会是极其严重的。我们已经进入了危险区，珊瑚礁已经开始下降。在目前的高二氧化碳条件下，珊瑚礁将不太可能维持它们自己几十年的稳定。但是，如果我们继续保持目前的排放方式，珊瑚礁的退化可能被推到一个临界点，这个点可能会出现在大约百万分之四百五十，当达到这个点时，根据我们的分析，珊瑚礁即使不是完全消失，也将是极为罕见的。一旦超过这个临界点，珊瑚礁将迅速萎缩，[206] 至少一半与珊瑚礁有关野生动物将成为稀有动物或完全消失，珊瑚礁对数百万人的贡献将陷于停顿。接着，珊瑚礁生态系统可能会减少到一个频于崩溃的空架子，只剩下寥寥无几的钙质珊瑚。[207] 由于珊瑚礁的形成，需要几十年甚至几百年，所以这种损害一旦完成，将会影响几代而不可逆转。

但是，未来的海洋并非一定如此。通过正确的选择，我们可以拯救珊瑚礁和依赖于它们的野生生物和人类，最终从海洋酸化和气候变化的危害中，拯救地球。要想有一个低碳的未来，大气中二氧化碳的浓度必须稳定在百万分之三百五十以下的安全水平。[208] 在这个水平以下，整个珊瑚礁生态系统仍然将发生变化，但这些变化将保持珊瑚的主导地位，并继续生成碳酸钙。[209]

要从海洋酸化中挽救珊瑚礁，我们必须将的大气中的二氧化碳稳定在百万分之三百五十或以下。通过分析研究其它脆弱的生态系统，科学家们也发现类似的极限，当超过这个极限后，正反馈循环将阻止全面复苏。通过防止海洋酸化以及将气候稳定在一个安全的水平，我们也将同时防止其它与气候有关的灾害。

我们不能指望立即简单地停止所有的排放量，但我们必须预期要达到并超过最终的百万分之三百五十的稳定目标。[210] 如果我们持续处在目前的危险地带，几十年后，将导致不能容忍的变化发生。这意味着，至关重要的是在未来几年内，要制定正确措施，以确保二氧化碳排放量峰值在未来不到十年的时间内开始下降。

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的结论是，为了使大气中的二氧化碳稳定在百万分之三百五十，全球二氧化碳排放量在2050年需要削减到低于2000年百分之八十五的水平，[211] 为了达到这个目标，附件一国家（工业化国家和经济正在转型的国家，如俄罗斯联邦）到2020年将其二氧化碳排放量减少到低于1990年百分之二十五到四十的水平。到2050年，需要减少到低于该水平百分之八十到九十。这些目标并不容易实现，因此，美国和国际社会必须立即严肃地承诺，以达到这些目标。

我们在未来几年里建立和实现我们短期目标的能力，将决定我们能否成功地稳定地球的气候。为了实现迫切需要的，到2020年削减二十五至四十个百分点的目标，所有的国家需要立即行动起来。等待行动的时间越长，要避免灾难的难度就越大。

Photo: © David Burdick

解决方案

风力涡轮机

在这个问题上，许多最重要的科学思想家已经表明，气候变化的失控是可以防止的，但肯定没有“银弹”，而且这样做并不容易。美国宇航局的**James Hanson** 强调，保护珊瑚所需要的，关键的百万分之三百五十的目标是可以实现的。毫不疑问，这将需要全世界每个人，每个公司和机构的共同努力。在他们研究的过程中，**Pacala** 和 **Socolow** 提出一个“基于楔子”的方法，涉及到十五种可行方案的不同组合，并得出结论：

> “人类已经拥有了基本的科技知识和工业技术，可以在未来的半个世纪解决碳和气候问题。”[212]

减少二氧化碳需要有意义和及时的行动，有很多不同的选择，从保护和提高能源效率，到先进的减少二氧化碳的技术，以及选择使用替代能源和可再生燃料。现有的多种解决方案，需要我们转变成为非依赖碳能源的经济，这就意味着，要建设替代能源的基础设施，例如太阳能，风力，以及氢。除非有效的碳捕获技术得到运用，必须减少或停止使用煤。它们还包括努力提高能源在小汽车，卡车，火车，飞机和船舶，以及在住宅，办公楼，发电和其它工业部门的有效利用率;减少毁林，同时要种植更多的森林，以帮助“拉低”二氧化碳的浓度水平。

在此期间，当碳燃料的使用无法避免的时候，如管道终端滤清设备和碳捕获等技术，将对减少释放到大气中的二氧化碳，发挥重要作用。若将减少二氧化碳排放的贡献也计入成本，这些替代品就可以进入市场，并真正具有竞争力。[213]

为了防止未来的海洋酸化，我们需要将二氧化碳排放量迅速增加的趋势，转换为净排放量已减少到零的新趋势。[214] 针对海洋酸化，一些不同的措施被提出，例如，向海洋水域添加化学品，以降低海洋酸度。但这些充其量只是短期的，局部的权宜措施，不会阻止全球范围内的海洋酸化。[215]

此外，这些局部性工程解决方案，可能摧毁已经十分脆弱的生态系统，并可能引起其它许多意外和不可预见的后果。

针对大气中的二氧化碳含量，局部性工程解决方案也被提出。其中包括“铁施肥”和深海封存，两者都有可能加剧海洋酸化。[216, 217, 218] 这些方法应该慎重地考虑，只有在它们的有效性得到证明，以及它们对海洋的影响被完全透彻地理解，并知道是微不足道的情况下，才可以使用。

不幸的是，自工业革命以来，由于人为的二氧化碳排放，海洋的酸性已经增加了百分之三十。当人类排放量减少到适当的水平，其对海洋酸度降低的影响，会有一些时间滞后。因此，至关重要的是，我们应当尽快削减二氧化碳排放量，使海洋状况不至于变得让许多海洋动物无法忍受。我们还必须尽我们所能，减少针对海洋生态系统的其它压力，以确保它们的应变能力，给予它们一切可能的生存机会。如过度捕捞和破坏性捕捞技术，污染和气候变化，所有这一切，都威胁和削弱着海洋生态系统，使生存状态更脆弱。通过制止这些和其它一些威胁，我们可以提供给海洋一个面对迫在眉睫的危险的海洋酸化，挣扎求生存的机会 。

从本质上讲，我们在这里所做的每一个决定，必须考虑到做出这些变化的实际需要。关于是否和如何将这些办法市场化，以及如何确定碳的价格仍然存在着争论，但有一点是明确的：如果我们想拯救我们的珊瑚礁和贝类渔业，以及依赖于它们的生态系统和作为人类从它们所获得的价值，我们需要现在就开始。全世界的工业化国家，到2020年需要减少百分之二十五到百分之四十的排放，我们没有时间可以浪费了。

同时，海洋酸化不应被视为一个理由，让我们举起的双手，并大声疾呼，拯救海洋已经没有希望了。事实不是这样。相反，我们应该认识到这种威胁的严重性，立即采取适当行动，以推动我们的社会摆脱对碳基矿物燃料的依赖，而向着一个低碳的未来，那时候，珊瑚礁和其他海洋生物将不再受到酸性海水的威胁。

建议

制定政策将大气中二氧化碳的含量稳定在百万分之三百五十

各国政府必须致力于将大气中二氧化碳的含量稳定在百万分之三百五十或以下。为了达到这个目标，在未来的五年需要有重大的举措，将整个社会引领到一条正确的道路，以达到在未来几十年做到碳的净排放量为零。

提倡使用高能源效率和低碳的燃料

利用一切机会节约能源，包括改进小汽车，卡车，飞机，船舶的燃料有效利用率，提供更纯净的燃料，投资高效率的集中货装运输，通过协调个人，机构和公司的行动来减少能源消耗。

改用替代能源

禁止新的或扩建的燃煤发电厂以及其它扩大使用煤炭的生产方式，直至造成全球变暖的污染物可以被捕获和安全储存。在这些地方，政府和私营部门应执行各种方案，以刺激开发和利用可再生能源的途径，如风能和太阳能，并投资提高国家输电电网，从而使其它资源产生的能量可以低成本有效地进入市场。各国政府应立即取消所有鼓励使用矿物燃料的补贴。目前处在敏感生态系统区域，如北极和近海一带，的矿物燃料应当继续保留在那里。

碳排放规范化

各国政府应立即着手建立碳排放的规范化系统，对排放者收取排放成本费，并阻止那些损害海洋的持续不断的排放。那些没有被规范化的二氧化碳排放源，例如来自海上航运和飞机的排放，应包括在后京都协定，并通过有关的国际机构，例如国际海事组织和国际民用航空组织，进行监管。

保护自然的恢复能力

为了维护海洋生态系统的自然恢复能力，应该减少另外一些由人类所造成的威胁，如过度捕捞和污染。海洋酸化和气候变化的威胁不是孤立的，它们与生态系统和物种所遭受的其它影响紧密相关。如果海洋生态系统的生存不同时受到其它的威胁，它们就会有最好的机会，从海洋酸化的压力下得到解脱。

Photo: E. Harrould-Kolieb

OCEAN ACIDIFICATION

尾注

1 Sabine, C.L. *et al.*. (2004) The Oceanic Sink for Anthropogenic CO2, Science 305:367-371

2 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

3 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2005) Ocean Model Predictions of Chemistry Changes from Carbon Dioxide Emissions to the Atmosphere and Ocean, Journal of Geophysical Research, Vol. 110

4 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.*. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

5 NASA Jet Propulsion Laboratory; Global Climate Change, NASA's Eyes on the Earth, http://climate.jpl.nasa.gov/

6 Luthi, Dieter *et al.*. (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, Nature, 453:379-382

7 Energy Information Administration (EIA) (2008) International Energy Outlook 2008, Highlights, http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html

8 Energy Information Administration (EIA) (2008) International Energy Outlook 2008, Highlights, http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html

9 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.*. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

10 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.*. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

11 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

12 Luthi, Dieter *et al.*. (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, Nature, 453:379-382

13 Orr, James C. *et al.*. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

14 Caldeira, K. and Wickett, M.E. (2005) Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean, Journal of Geophysical Research, 10:C09S04

15 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

16 Fabry, Victoria J. *et al.*. (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432

17 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO_2 World, Journal of Geophysical Research, 110:C09S06

18 Fabry, Victoria J. *et al.*. (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432

19 Feely, Richard, *et al.*. (2004) Impacts of Anthropogenic CO_2 on the $CaCO_3$ System in the Oceans. Science, 305:362-366

20 Gazeau, Frederic *et al.*. (2007) Impact of Elevated CO_2 on Shellfish Calcification, Geophysical Research Letters, 34

21 For example: Bibby, R. *et al.*. (2008) Effects of Ocean Acidification on the Immune Response of the Blue Mussel *Mytilus edulis*, Aquatic Biology, 2:67-74, Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlager (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, Journal of Oceanography, 60:705-718, Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO_2 on Planktonic Copepods and Sea Urchins, Journal of Oceanography, 60:743-750, Castro, K. *et al* (2006) The Conceptual Approach to Lobster Shell Disease Revisited, Journal of Crustacean Biology, 26(4):646-660

22 Fabry, Victoria J. *et al.*. (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432

23 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO_2 and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195

24 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.*. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

25 Guinotte, J.M. *et al.*. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? *Frontiers Ecol. Env.* 4:141-146

26 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO_2 World, Journal of Geophysical Research, 110:C09S06

27 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO_2 World, Journal of Geophysical Research, 110:C09S06

28 FAO (Food and Agriculture Organisation) (2004) The State of the World Fisheries and Aquaculture 2004, FAO, Rome

29 Ishimatsu, Atsushi *et al.*. (2004) Effects of CO_2 on Marine Fish: Larvae and Adults, Journal of Oceanography, 60:731-741

30 Roberts, S. and Hirshfield, M. (2004) Deep Sea Corals: Out of Sight, But no Longer out of Mind, Front. Ecol. Environ., 3:123-130

31 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

32 Hansen, J. *et al.*. (2008) Target Atmospheric CO_2: Where Should Humanity Aim?

33 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.*. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

34 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO_2 and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195

35 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2005) Ocean Model Predictions of Chemistry Changes from Carbon Dioxide Emissions to the Atmosphere and Ocean, Journal of Geophysical Research, 110:C09S04

36 Fabry, Victoria J. *et al.*. (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432

37 Sabine, C.L. *et al.*. (2004) The Oceanic Sink for Anthropogenic CO_2, Science, 305:367-371

38 Watson, A.J. and J.C. Orr (2003) "Carbon dioxide fluxes in the global ocean" In M.J.R. Fasham (Ed.) *Ocean Biogeochemistry*. The IGBP Series, Springer, New York

39 Schubert, R. *et al.*. (2006) The Future Ocean – Warming Up, Rising High, Turning Sour: Special Report, German Advisory Council on Global Change (WBGU)

40 Orr, James C. *et al.*. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

41 Caldeira, K. and Wickett, M.E. (2003) Anthropogenic Carbon and Ocean pH, Nature 425:365

42 Orr, James C. *et al.*. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

43 Bindoff, N.L., *et al.*. (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S.,D. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

44 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2005) Ocean Model Predictions of Chemistry Changes from Carbon Dioxide Emissions to the Atmosphere and Ocean, Journal of Geophysical Research, Vol. 110

45 Luthi, Dieter *et al.*. (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, Nature, 453:379-382 and Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448 and Bindoff, N.L., *et al.*. (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S.,D. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

46 Sabine, C.L. *et al.*. (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO2. Science 305: 367-371

47 Sabine, C.L. and R. Feely (2007) The Oceanic Sink for Carbon Dioxide In Greenhouse Gas Sinks, D. Reay *et al.*. (Eds.) CABI Publishing, Oxfordshire, UK

48 Sabine, C.L. *et al.*. (2004) The

Oceanic Sink for Anthropogenic CO2, Science 305:367-371

49 Feely, R.A. *et al*.. (2008) Evidence for Upwelling of Corrosive "Acidified" Water onto the Continental Shelf, Report, Sciencexpress, 10:1126

50 Calculated from: EIA (2007) Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2006, DOE/EIA-0573(2006)

51 Luthi, Dieter *et al*.. (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, Nature, 453:379-382

52 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

53 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

54 Siegenthaler, U. *et al*.. (2005) Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene, Science, 310:1313-1317

55 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

56 Adapted from: Fernand, L. and Brewer, P. (Eds) (2007) Report of the Workshop on the Significance of Changing Ocean CO_2 and pH in Shelf Sea Ecosystems, defra and ICES CIEM

57 Caldeira, K. and Wickett, M.E. (2003) Anthropogenic Carbon and Ocean pH, Nature 425:365

58 Feely, R.A *et al*.. (2004) Impact of Anthropogenic CO2 on the CaCO3 system in the oceans, Science 305:362-366

59 Veron, J.E.N, (2008) A Reef in Time: The Great Barrier Reef from Beginning to End, Harvard University Press, Sydney

60 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

61 Zachos, James, *et al*.. (2005) Rapid Acidification of the Ocean During the Paleocene-Eocene Thermal Maxiumu, Science, 308:1611-1615

62 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO_2 and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195

63 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

64 Feely, Richard, *et al*.. (2004) Impacts of Anthropogenic CO2 on the CaCO3 System in the Oceans. Science, 305:362-366

65 Orr, James C. *et al*.. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-First Century and its Impacts on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

66 Fabry, Victoria J. *et al*.. (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432

67 Doney, Scott C. (2007) The Dangers of Ocean Acidification, Scientific American, 294:58-65

68 Gehlen, M. *et al*.. (2007) The Fate of Pelagic CaCO3 Production in a High-CO2 Ocean: A model study, Biogeosciences, 5:505-419

69 Orr, James C. *et al* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

70 Gehlen, M. *et al*.. (2007) The Fate of Pelagic CaCO3 Production in a high CO2 Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519

71 Orr, James C. *et al*.. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

72 Schubert, R. *et al*.. (2006) The Future Ocean – Warming Up, Rising High, Turning Sour: Special Report, German Advisory Council on Global Change (WBGU)

73 Orr, James C. *et al*.. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impacts on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

74 Cao L., & Caldeira K, (2008) Atmospheric CO2 stabilization and ocean acidification. Geophysical Research Letters, in press

75 Orr, James C. *et al*.. (2006) Arctic Ocean Acidification, EOS Transactions of the American Geophysical Union, 87(36), Ocean Sciences Meeting Supplement, Abstract 0S14B-01

76 Bibby, R. *et al*.. (2008) Effects of Ocean Acidification on the Immune Response of the Blue Mussel Mytilys edulis, Aquatic Biology, 2:67-74

77 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

78 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO_2 and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195

79 Kleypas, Joan and Chris Langdon (2000) Overview of CO2-Induced Changes in Seawater Chemistry, Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia, 2:1085-1089

80 Feely, Richard A. (2004) Impact of Anthropogenic CO2 on the CaCO3 System in the Oceans, Science, 305:362-266

81 Gehlen, M. *et al*.. (2007) The Fate of Pelagic CaCO3 Production in a high CO2 Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519

82 Kleypas. JA *et al*.. (2006) Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A guide for future research, Report on a workshop sponsored by NSF, NOAA, USGS

83 Sakai, K. (1998) Delayed maturation in the colonial coral Goniastrea aspera (Scleractinia): Whole-colony mortality, colony growth and polyp egg production, Res. Popul. Ecol., 40:287-292

84 Kleypas. JA *et al*.. (2006) Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A guide for future research, Report on a workshop sponsored by NSF, NOAA, USGS

85 Gehlen, M. *et al*.. (2007) The Fate of Pelagic CaCO3 Production in a high CO2 Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519

86 Personal correspondence with Ove Hoegh-Guldberg, 24 October 2007

87 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO_2 and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195

88 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

89 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO2 World, Journal of Geophysical research, 110:C09S06

90 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*.. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

91 Cao L., & Caldeira K, (2008) Atmospheric CO2 stabilization and ocean acidification. Geophysical Research Letters, in press; and Personal correspondence with Ken Caldeira

92 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*.. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

93 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*.. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

94 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

95 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*.. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

96 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*.. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

97 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO2 World, Journal of Geophysical Research, 110

98 Stone, Richard (2007) A World Without Corals? Science, 316:678-681

99 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*.. (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

100 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

101 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO_2 and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195

102 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M Guinotte (2007) Corals in Deep-Water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26(3):445-448

103 Roberts, S. and Hirshfield, M. (2004) Deep Sea Corals: Out of Sight, But no Longer out of Mind, Front. Ecol. Environ., 3:123-130

104 Husebo, A. *et al*.. (2002) Distribution and abundance of fish in deep-sea coral habitats, Hydrobiologia, 471:91-99

105 Guinotte, John M, *et al*.. (2006) Will Human-Induced Changes in Seawater Chemistry Alter the Distribution of Deep-Sea Scleractinian Corals? Frontiers in Ecological Environment, 4(3):141-146

106 Maxwell, S. (2005) An aquatic pharmacy: The biomedical potential of the deep sea. Current: The Journal of Marine Education 21(4):31-32

107 Erlich, H. *et al*.. (2005) Deep-Sea Bamboo Corals: Living Bone Implants. 3rd International Symposium on Deep-Sea Corals: Science and Management

108 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, Annals of the New York Academy of Sciences, 1134:320-342

109 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

110 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M Guinotte (2007) Corals in Deep-Water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26(3):445-448

111 Guinotte, J.M. *et al*.. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? Frontiers Ecol. Env. 4:141-146

112 Guinotte, J.M. *et al*.. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? Frontiers Ecol. Env. 4:141-146

113 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, Annals of the New York Academy of Sciences, 1134:320-342

114 Roberts, J. Murray, *et al*.. (2006) Reefs of the Deep: The Biology and Geology of Cold-Water Coral Ecosystems, Science, 312:543-547

115 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, Annals of the New York Academy of Sciences, 1134:320-342

116 ISRS (2007) Coral Reefs and Ocean Acidification Briefing Paper 5, International Society for Reef Studies

117 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

118 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448

119 Guinotte, J.M. *et al*.. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? Frontiers Ecol. Env. 4:141-146

120 Guinotte, J.M. *et al*.. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? Frontiers Ecol. Env. 4:141-146

121 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

122 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2003) Anthropogenic Carbon and Ocean pH: The coming centuries may see more ocean acidification than the past 300 million years, Nature, 425

123 Gehlen, M. *et al*.. (2007) The Fate of Pelagic CaCO3 Production in a high CO2 Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519

124 Jokiel, P.L. *et al*.. (2008) Ocean Acidification and Calcifying Reef Organisms: A mesocosm investigation, Coral Reefs, 27:473-483

125 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, Annals of the New York Academy of Sciences, 1134:320-342

126 Jokiel, P.L. *et al*.. (2008) Ocean Acidification and Calcifying Reef Organisms: A mesocosm investigation, Coral Reefs, 27:473-483

127 Jokiel, P.L. *et al*.. (2008) Ocean Acidification and Calcifying Reef Organisms: A mesocosm investigation, Coral Reefs, 27:473-483

128 Orr, James C. *et al*.. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-First Century and its Impacts on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686

129 Aydin, Kerim Y. *et al*.. (2005) Linking ocean food webs to coastal production and growth rates of Pacific Salmon (Oncorhynchus spp.), using models on three scales, Deep Sea Research Part II: tropical Studies in Oceanography, 52(5-6):757-780

130 Fabry, Victoria J. *et al*.. (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432

131 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, Annals of the New York Academy of Sciences, 1134:320-342

132 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, Annals of the New York Academy of Sciences, 1134:320-342

133 Gehlen, M. *et al*.. (2007) The Fate of Pelagic CaCO3 Production in a high CO2 Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519

134 Iglesias-Rodriguez, M. Debora *et al*.. (2008) Phytoplankton Calcification in a High-CO2 World, Science, 320:336-340

135 Tyrell, T *et al*.. (1999) Optical Impacts of Oceanic Coccolithopore Blooms. Journal of Geophysical Research, 104(C2):3323-3341

136 Vogt, M. *et al*.. (2008) Dynamics of dimethylsulphoniopropionate and dimethylsulphide under different CO2 concentrations during a mesocosm experiment, Biogeosciences, 5:407-419

137 Charlson, R., *et al*.. (1987) Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate, Nature, 326:655-661

138 Nevitt, G. and Haberman, K. (2003) Behavioral attraction of Leach's storm-petrels (Oceanodroma leucorhoa) to dimethyl sulfide, The Journal of Experimental Biology, 206:1497-1501

139 DeBose, J, Lema, S. and Nevitt, G. (2008) Dimethylsulfoniopropionate as a Foraging Cue for Reef Fish, Science, 319:1356

140 Kowalewsky, S. *et al*.. (2006) High Olfactory Sensitivity for Dimethyl Sulphide in Harbor Seals, Biology Letters, 2:106-109

141 Shirayama, Y. and H. Thorton (2005) Effect of Increased Atmospheric CO2 on Shallow Water Marine Benthos, Journal of Geophysical Research, 110:C09S08

142 Kleypas. JA *et al*.. (2006) Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A guide for future research, Report on a workshop sponsored by NSF, NOAA, USGS

143 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

144 Bibby, R. *et al*.. (2008) Effects of Ocean Acidification on the Immune Response of the Blue Mussel Mytilus edulis, Aquatic Biology, 2:67-74

145 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlager (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, Journal of Oceanography, 60:705-718

146 Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO2 on Planktonic Copepods and Sea Urchins, Journal of Oceanography, 60:743-750

147 Castro, K. *et al.* (2006) The Conceptual Approach to Lobster Shell Disease Revisited, Journal of Crustacean Biology, 26(4):646-660

148 Personal Communications with Dr. Robert Steneck

149 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlager (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, Journal of Oceanography, 60:705-718

150 Ishimatsu, Atsushi, *et al*.. (2004) Effects of Carbon Dioxide on Marine Fish: Larvae and Adults, Journal of Oceanography, 60: 731-741

151 Bibby, R *et al.* (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod Littorina littorea, Biology Letters, 3:699-701

152 Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO2 on Planktonic Copepods and Sea Urchins, Journal of Oceanography, 60:743-750

153 Havenhand, Jon. *et al*.. (2008) Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin, Current Biology, 18(5):651-652

154 Dong, Q.X. *et al*.. (2002) Factors affecting sperm motility of tetraploid Pacific oysters, Journal of Shellfish Research, 21:719-723

155 Luo, J. *et al*.. (2004) The influence of pH and salinity in hatching rate of egg sac of Babylonia areolate and the effect of different diet on the development, survival rate of the larvae, Marine Sciences/Haiyang Kexue 28:6:5-9

156 Kurinara, H. *et al*.. (2004) Effects of raised CO2 concentration on the egg production rates and early development of two marine copepods (Arctia steri and Acartia erythraea), Marine Pollution Bulletin, 49:721-727

157 Kurihara, Haruko and Atsushi Ishimatsu (2008) Effects of high CO2 seawater on the copepod (Acartia tsuensis) through all life stages and subsequent generations, Marine Pollution Bulletin, 56(6):1086-1090

158 Written testimony of Ken Caldeira, Climate Change and Acidification are Affecting our Oceans; presented before the Subcommittee on fisheries, Wildlife and Oceans House Committee on Natural resources, "Wildlife and Oceans in a Changing Climate" hearing, 17 April 2007

159 Portner, Hans O. and S. Zielinsk (1998) Environmental Constraints and the Physiology of Performance in Squids, South African Journal of Marine Science, 20:207-221

160 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlager (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, Journal of Oceanography, 60:705-718

161 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlager (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, Journal of Oceanography, 60:705-718

162 Bibby, R *et al*... (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod Littorina littorea, Biology Letters, 3:699-701

163 Bibby, R *et al*... (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod Littorina littorea, Biology Letters, 3:699-701

164 Wood, Hannah L. *et al*.. (2008) Ocean acidification may increase calcification rates, but at a cost, Proceedings of the Royal Society B, 274(1644):1767-1773

165 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

166 Fabry, Victoria J. *et al*... (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432

167 Ishimatsu, Atsushi, *et al*.. (2004) Effects of Carbon Dioxide on Marine Fish: Larvae and Adults, Journal of Oceanography, 60: 731-741

168 Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO2 on Planktonic Copepods and Sea Urchins, Journal of Oceanography, 60:743-750

169 Gazeau, Frederic *et al*... (2007) Impact of Elevated Carbon Dioxide on Shellfish Acidification, Geophysical Research Letters, Vol. 34

170 Gazeau, Frederic *et al*... (2007) Impact of Elevated Carbon Dioxide on Shellfish Acidification, Geophysical Research Letters, Vol. 34

171 Gazeau, Frederic *et al*... (2007) Impact of Elevated Carbon Dioxide on Shellfish Acidification, Geophysical Research Letters, Vol. 34

172 Gazeau, Frederic *et al*... (2007) Impact of Elevated CO_2 on Shellfish Calcification, Geophysical Research Letters, 34

173 Nagarajan, R., Lea, S., and Goss-Custard, J.D. (2006) Seasonal Variations in Mussel, *Mytilus edulis L.* Shell Thickness and Strength and Their Ecological Implications, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 339:241-250

174 Gazeau, F. *et al*... (2007) Impact of Elevated CO_2 on Shellfish Calcification, Geophysical Research Letters, 34:L07603

175 Michaelidis, B *et al*... (2005) Effects of Long-Term Moderate Hypercapnia on Acid-Base Balance and Growth Rate in Marine Mussels *Mytilus gallopprovincialis*, Marine Ecological Progress. 293:109-118

176 Berge, J.A *et al*... (2006) Effects of Increased Sea Water Concentrations of CO_2 on the Growth of the Bivalve *Mytilus edulis L.*, Chemosphere, 62:681-687

177 Bibby, R *et al*... (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod *Littorina littorea*, Biology Letters, 3:699-701

178 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO_2 World, Journal of Geophysical research, 110:C09S06

179 Cesar, H. *et al*... (2003) The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation, Cesar Environmental Economics Consulting

180 FAO (Food and Agriculture Organisation) (2004) The State of the World Fisheries and Aquaculture 2004, FAO, Rome

181 Cesar, H. *et al*... (2003) The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation, Cesar Environmental Economics Consulting

182 Fernando, H. *et al*... (2005) Coral Poaching Worsens Tsunami Destruction in Sri Lanka, EOS Trans. AGU, 86:33

183 On Asia's Coasts, Progress destroys natural defenses, The Wall Street Journal, Dec 31, 2004, Reported by A. Brown

184 Kunkel, C. *et al*... (2006) Coral Reefs Reduce Tsunami Impact in Model Simulations, Geophysical Research Letters, 33:L23612

185 U.S. EPA; Region 9; Water Program; Oceans, Coasts and Estuaries; Coral Reefs, www.epa.gov/region09/water/oce/coralreefs.html

186 FAO (2007) The State of World Fisheries and Aquaculture, 2006, FAO Fisheries and Aquaculture Department

187 Ishimatsu, Atsushi *et al*... (2004) Effects of CO_2 on Marine Fish: Larvae and Adults, Journal of Oceanography, 60:731-741

188 Kokita, T. and A. Nakazono (2001) Rapid response of an obligately corallivorous filefish *Oxymonacanthus longirostris* (Monacanthidae) to a mass coral bleaching event, Coral Reefs, 20:155-158

189 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M Guinotte (2007) Corals in Deep-Water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26(3):445-448

190 Roberts, S. and Hirshfield, M. (2004) Deep Sea Corals: Out of Sight, But no Longer out of Mind, Front. Ecol. Environ., 3:123-130

191 Pritchard, E. S. (Ed) (2008) Fisheries of the United States, 2007, National Marine Fisheries Service, Office of Science and Technology, http://www.st.nmfs.noaa.gov/st1/fus/fus07/fus_2007.pdf

192 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlager (2004) Biological Impact of Elevated CO_2 Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth history, Journal of Oceanography, 60:705-718

193 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlager (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, Journal of Oceanography, 60:705-718

194 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, Annals of the New York Academy of Sciences, 1134:320-342

195 FAO (Food and Agriculture Organisation) (2004) The State of the World Fisheries and Aquaculture 2004, FAO, Rome

196 Raven, John *et al*... (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

197 Gazeau, Frederic *et al*... (2007) Impact of Elevated CO_2 on Shellfish Calcification, Geophysical Research Letters, 34

198 FIGIS: Global Production Statistics 1950-2005: www.fao.org/figis

199 NMFS: Annual Commercial Landing Statistics; www.st.nmfs.noaa.gov/pls/webpls/FT_HELP.SPECIES

200 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*... (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

201 NASA Jet Propulsion Laboratory; Global Climate Change, NASA's Eyes on the Earth, http://climate.jpl.nasa.gov/

202 Luthi, Dieter *et al*... (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, Nature, 453:379-382

203 Luthi, Dieter *et al*... (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, Nature, 453:379-382

204 Energy Information Administration (EIA) (2008) International Energy Outlook 2008, Highlights, http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html

205 Energy Information Administration (EIA) (2008) International Energy Outlook 2008, Highlights, http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html

206 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*... (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

207 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*... (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

208 Hansen, J. *et al*... (2008) Target Atmospheric CO_2: Where Should Humanity Aim?

209 Hoegh-Guldberg, Ove *et al*... (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742

210 Hansen, J. *et al*.. (2008) Target Atmospheric CO_2: Where Should Humanity Aim?

211 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

212 Pacala, S. and R. Socolow (2004) Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, Science, 305:968-972

213 Energy Information Administration (EIA) (2008) International Energy Outlook 2008, Highlights, http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html

214 Matthews, H. Damon and Ken Caldeira (2008) Stabilizing climate requires near-zero emissions, Geophysical Research Letters, 35:L04705

215 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

216 Hawkins, D.G. (2004) No Exit: Thinking about leakage from geologic carbon storage sites, Energy, 29:1571-1578

217 Raven, John *et al*.. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society

218 Busseler, Ken O. *et al*.. (2008) Ocean Iron Fertilization – Moving Forward in a Sea of Uncertainty, Science, 319:162

欧西那 (Oceana) 致力于保护和恢复世界各大洋。我们的海洋科学家，经济学家，律师和倡导者成功地促成了明确和顽固的政策得到改变，以减少污染，防止鱼类种群，海洋哺乳动物和其他海洋生物不可逆转的崩溃。致力于全球范围的天然资源的保护，欧西那的活动家遍及大洋洲，北美，欧洲和南美洲。来自超过150个国家的，30多万成员和电子活动家已经加入了欧西那。欲了解更多信息，请访问 www.Oceana.org.

OCEANA | Protecting the World's Oceans
www.oceana.org/climate

1350 Connecticut Ave., NW, 5th Floor
Washington, DC 20036 USA