

阐明要点

《海洋酸化：问题解答》提供一个新的观察视角，让人们了解更多有关全球性海洋酸化的问题。

本指南主要包括四方面的新内容：解答人们提出的有关海洋酸化的关键问题；谈谈国际科学界对海洋已经发生变化的观点；探讨在CO₂浓度升高的地球上，未来海洋的变化趋势；探讨目前正在发生的一切可能对人类带来什么样的后果。

《海洋酸化：问题解答》是继2009年冬天哥本哈根联合国气候变化大会上成功发布的多语版《海洋酸化的事实》之后的第二本指南，这本指南将提供更具技术性的解答，推进科学理念。

我们希望 通过问题解答，加深人们对海洋酸化等重大问题的了解，加强人们的环境保护意识，提高积极性和紧迫感，达成共识，共同解决人类面临的这一重要环境问题。

《摩纳哥宣言》已发表两年

两年前，我主持了一个由政府间海洋学委员会 (IOC)、国际海洋科学研究委员会 (SCOR)、摩纳哥政府及我自己的基金会共同主办的一个研讨会“高浓度CO₂下的海洋”，有来自26个国家的150多位杰出的海洋科学家参加。这些科学家共同呼吁政府决策者立刻采取措施，减少CO₂排放，以免由于CO₂浓度持续升高导致海洋酸化，从而对海洋生态系统产生更广泛、更剧烈的影响。很高兴这些倡议形成了《摩纳哥宣言》的核心，我非常愿意全力支持。

两年来，国际科学界已围绕海洋酸化问题开展了大量的工作，得出的一些结论可能与早期对海洋酸化影响的预测结果相悖。但自从《摩纳哥宣言》发布以来，人们对海洋酸化有了更多的认知，并更加关注CO₂排放的速度和规模对海洋的影响以及海洋对此的响应。

我很高兴我的基金会能够为《海洋酸化：问题解答》这一指南提供支持。这一次科学界再次聚首，与海洋酸化资源共享联盟共同解决一个新问题——纠正有关海洋酸化的不确定性和误导信息。

我相信，对于新出现的问题，这本问答里所做的解释和回答将有助于消除疑问，帮助人们更加了解海洋酸化，并将给决策者更好的建议，以解决海洋酸化所带来的问题。

摩纳哥王子艾伯特



Photo © Palais Princier

背景

自19世纪30年代第一次工业革命结束以来，人类通过燃烧化石燃料、砍伐森林与生产水泥等，已将超过4400亿吨的 CO_2 排放到大气当中（其中一半于近30年排放），大规模地释放了之前被“禁锢”的碳，增强了温室效应，并导致地球气候的不稳定。幸运的是，这些大量排放的 CO_2 至少有三分之一被植物和海洋所吸收，大大减缓了气候变化的速度及其带来的影响，但这却对海洋带来了其他影响。

使用JAGO号潜艇采集220米水深处冷水珊瑚礁，并开展观测。



Photo © Karen Hsiang, IFM-GEOMAR

CO_2 带来的另一难题

当越来越多的 CO_2 从大气溶入海水时，海水中发生许多化学变化，这种现象被统称为“海洋酸化”，也是所谓的“ CO_2 带来的另一难题”，或称为“全球变暖的罪恶孪生兄弟”。尽管海洋酸化现象最近才引起注意，它却和气候变化引起的全球变暖一样，将产生巨大的影响。事实上，气候变化现象分散、难以追踪，而海洋酸化的恶化却可测量并可预测。最近的研究表明，海表吸收 CO_2 的速率及其所导致的海洋酸化速率比末次冰期（2万年以前）快了100倍，而末次冰期被认为是最近一次的 CO_2 急剧上升期。

海洋正在快速酸化

过去2500万年海洋pH值的变化。 Source after Turley et al. in Avoiding Dangerous Climate Change (2006).



解决困惑，提供真相

2005年，海洋酸化问题出现在英国皇家学会发表的一份报告中，首次得到科学界以外人士的重视。早在20世纪70年代，就曾科学文献报道过海洋酸化，但直到皇家学会报告发表的前10年，这一研究才比较有连贯性。自2005年以来，世界各地开展了许多与此相关的重大研究，尽管仍有许多悬而未决的问题，但科学家们已形成共识，认为海洋酸化是真实存在的，并将威胁人类的生存方式。例如，国际科学院组织发表了一份有关海洋酸化的声明，指出“即使大气中的CO₂稳定在450ppmv¹，海洋酸化仍将在许多海洋生态系统中产生深远的影响。到2050年，全球CO₂排放量必须减少至少一半”。

目前我们面临的一个巨大挑战是，许多人对海洋酸化不以为然，觉得这是复杂和令人疑惑的科学问题。事实上，我们必须尽快让人们意识到问题的严重性，缓解海洋酸化的后果刻不容缓，并需要全世界的努力。为加快这一进程，来自5个国家19个研究所的27名知名科学家在2009年冬天哥本哈根联合国气候变化大会之后，联合向公众提供相关资料，解答有关海洋酸化的常见问题²。在这些科学家的分析与讨论基础上，形成了这本指南。

南极洲的水域是大洋pH变化最快的地区之一。

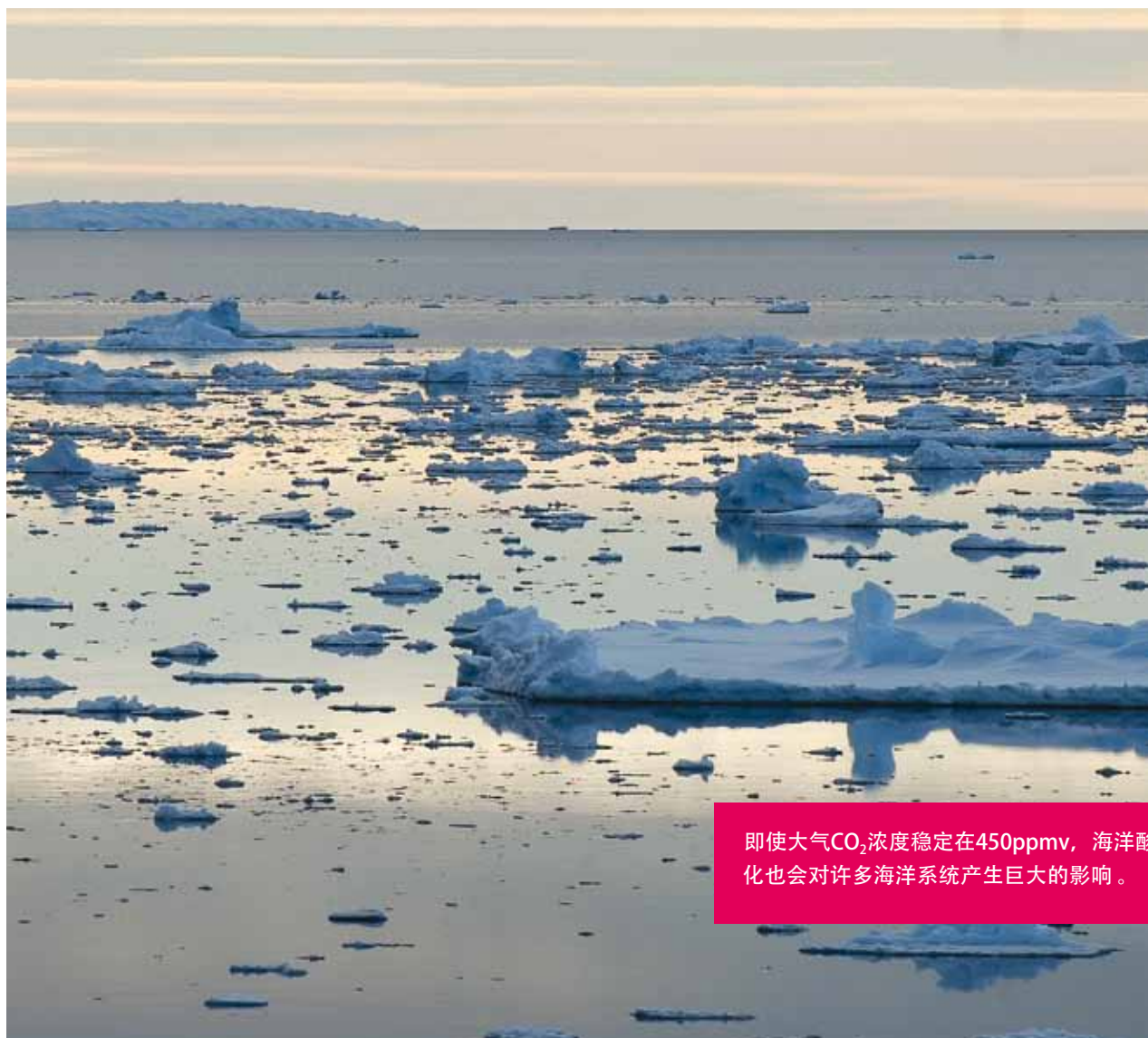


Photo © John M Baxter

即使大气CO₂浓度稳定在450ppmv，海洋酸化也会在许多海洋系统产生巨大的影响。

1. Ppmv是体积的百万分之一，1ppmv表示百万份混合空气中的一份特定气体

2. 这是由美国海洋碳和生物地球化学项目主导开展的工作(OCB; www.us-ocb.org)，由欧洲海洋酸化计划和英国海洋酸化研究组资助(<http://www.epoca-project.eu>; <http://www.oceanacidification.org.uk>)。项目首席科学家们将39个常见问题的权威回答汇编成册。

正在进行或正在规划的主要研究

欧盟

欧盟委员会已经启动资助了“欧洲海洋酸化研究计划 (EPOCA)”。这个项目目前正在进行,由欧洲的10个国家31个研究机构跨国合作,主要研究海洋酸化及其影响,通过监测海洋酸化及其对海洋生物与生态系统的影响,确定继续酸化的风险,并了解这些变化将如何从整体上影响整个地球系统。另一个针对地中海地区的新研究项目“气候变化下的地中海酸化 (MedSeA)”也将于短期内启动。

德国

启动了“海洋酸化的生物学影响 (BIOACID)”计划。这个项目由18个研究机构参与,于2009年9月启动,为期3年,由德国联邦教育研究部资助。它主要从亚细胞到生态系统水平上探讨海洋酸化对生物的影响及其对生态系统功能和生物地球化学响应的潜在影响。

中国

中国科技部和国家自然科学基金委员会已经开始支持海洋酸化相关研究。“中国近海碳收支、调控机理及生态效应”973项目于2009年启动,为期5年,由7个研究机构合作开展,投入3400万人民币,研究中国沿海碳通量及高CO₂和海洋酸化的生态效益。另外,国家自然科学基金委自2006年开始资助海洋酸化方面的研究,目前已有多个项目正在进行,探讨海洋酸化对钙化生物体的影响。

韩国

韩国科学与工程基金会资助了一个为期5年、由韩国5个实验室共同合作的项目,利用中生态系统研究CO₂和温度升高对浮游植物群落的影响。

日本

与海洋酸化相关的研究项目主要有5个。由日本环境厅资助,采用复杂的隔离生态系统设施,研究海洋酸化对各种海洋生物的影响(如酸化对生物体钙化的影响)。日本科教文卫省和海洋科学技术局也在预测未来海洋状态的地球系统模拟计算机等方面支持海洋酸化的研究。

英国

在2004至2007年，英国环境、食品及农村事务部和贸易工业部等政府部门联合资助了一项关于“CO₂的海洋环境效应（IMCO₂）”的研究。2009年春，英国政府公布了一项“海洋生态系统对海洋酸化的响应”的研究项目，为期5年，耗资1200万英镑（经费由自然环境研究委员会、环境、食物及农村事务部、能源及气候变化部共同承担），由英国21个研究机构联合开展，并与“欧洲海洋酸化项目（EPOCA）”及“海洋酸化的生物学影响（BIOACID）”合作。

美国

美国总统奥巴马于2009年3月签署《美联邦海洋酸化研究与监测法：2009年》，该法案属于美国111-11公共法。根据该法案，美国国家海洋和大气管理局，国家科学基金会和其他联邦机构正在与美国海洋研究和资源咨询委员会（ORRAP）海洋酸化工作组共同制定一项关于应对海洋酸化的国家方案。从2010年起，这个机构间联合工作组开始集合这些机构在海洋酸化监测、研究、影响评价以及保护方面的投入，并据此形成国家战略计划，将于2011年3月提交国会。其中的一些机构也已经开始资助法案中所列举的海洋酸化研究、监测及公众开放活动。

澳大利亚

澳大利亚的海洋酸化研究主要聚焦于南极和澳大利亚地区。南极气候与生态系统合作研究中心（与南极局、塔斯马尼亚大学、联邦科学与工业研究组织、气候变化与能源部、新西兰国家水与大气研究所、德国阿尔弗雷德-魏格纳研究所联合）在南大洋研究海水化学变化监测及主要生物物种对该变化的响应研究。在热带地区，由澳大利亚联邦科学与工业研究组织、美国海洋与大气管理局、日本国立环境研究所与昆士兰大学共同启动大堡礁与南太平洋地区的联合观测与数模研究项目。人们日益重视大堡礁对海洋酸化的响应研究，澳大利亚海洋科学研究所以及澳大利亚国立大学、昆士兰大学、悉尼大学、詹姆斯库克大学等高校正通过对礁石周围水体的大范围监测、珊瑚核心的古生物学重建以及对珊瑚生物的野外和室内实验来研究大堡礁对海洋酸化的敏感性。

认清事实

看到“海洋酸化”一词,人们通常会发出两个疑问:海洋酸化是什么?是真的吗?

这是对海洋缺乏了解的人表现出的自然反应,他们对气候变化一说表示质疑,最近又惊讶地发现,还有海洋酸化这一大问题伴其左右。

大多数人都认为:不管海洋酸化是什么,都没有气候变化来得真实,或者说,与气候变化没什么不同。所以新闻报道总是将海洋酸化与气候变化及其发展联系在一起。然而,气候变化和海洋酸化显然是太遥远的问题,所以大多数人只是日复一日的过着自己的日子,应付眼前的问题。大部分人并不了解,气候变化存在许多难以量化的不确定性,而“海洋酸化是什么、有没有可能发生”这样的基本概念却可以量化验证。

海洋酸化是什么?

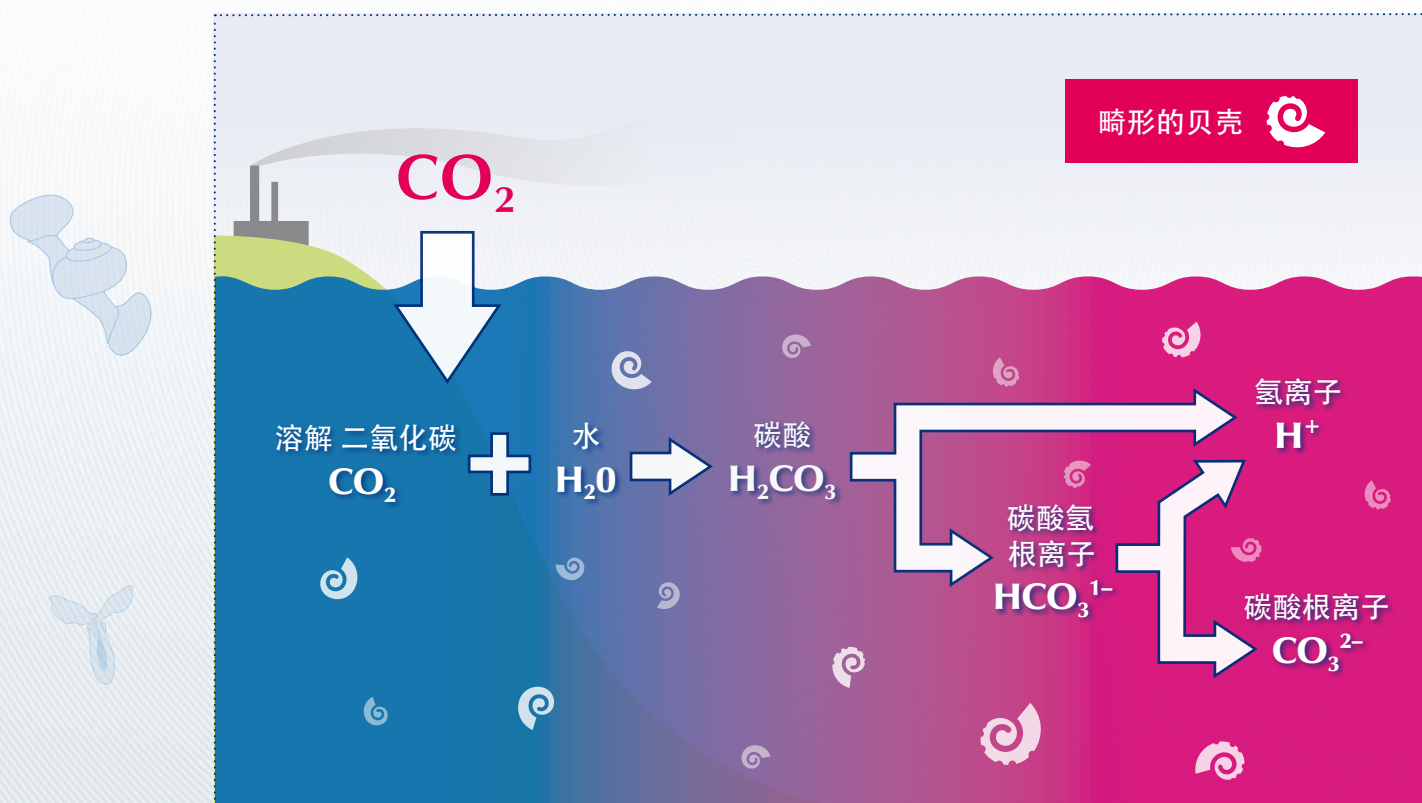
由于大气中 CO_2 的不断增长,海水性质发生变化,其酸度升高(或碱度降低),这就是所谓的海洋酸化。 CO_2 与海水反应,产生碳酸,如果大气 CO_2 增加得越快,海水酸化的速度就越快。

认识“碳酸盐”和“酸度”

海洋酸化与气候变化大有不同。气候变化代表着人类活动带来的一系列影响,无论从发生频率、尺度还是影响范围看,都是不可预见的,有极大的不确定性。而海洋酸化则是 CO_2 被海水所吸收对海水的直接影响。“海洋酸化”一词,总结了 CO_2 与海水发生反应的几个过程,其中以下两种最为重要:首先,碳酸形成,随后释放出氢离子:



化石燃料的燃烧导致大气中 CO_2 浓度升高,海洋对其吸收使海洋更酸。Source University of Maryland.



pH值

pH值是表示物质酸碱度的一种方式，1909年被提出，指的是水溶液中氢离子的总数和总质量的比。它表示所含氢离子浓度的常用对数的负值，即若氢离子浓度升高，则pH值下降。水的pH值是7，当小于7时呈酸性，大于7时呈碱性。pH值为4时，它的酸度是pH值为5的10倍，是pH值为6的100倍。海水目前的pH值大约为8.1，因此是弱碱性。pH指数一般在0-14之间，但理论上也存在超出这一浓度范围的可能性。

上述反应和氢离子的释放，增加了海水的酸性，导致pH值降低（见下文方框）。第二个反应则在碳酸离子、CO₂和水之间发生，产生碳酸氢根离子：



这两种反应的耦合效应不仅增加了海水的酸度，同时也降低了碳酸根离子的浓度。钙质骨骼和贝壳的形成过程（也即“钙化过程”）离不开碳酸根离子。碳酸根离子一旦减少，就可能造成巨大的生物学影响，因为它将影响一些海洋生物钙质骨骼或外壳的形成，从而减缓它们的生长速率，如珊瑚、软体动物、甲壳类动物、海胆以及一些藻类等。在低pH（较高的酸度）条件下，碳酸根离子较少，钙化作用难以实现，或有可能完全无法实现。因此，海洋酸化对海洋生物及许多具有重要经济价值的物种将产生灾难性后果。

“酸化”的概念

海洋目前的pH值大于7.0，因此是“碱性的”；但从化学的角度来看，我们却认为它实际上已经变酸。为什么我们要用“海洋酸化”这一词呢？因为无论海水本身是酸性还是碱性，其发展的趋势是“变酸”。同样的术语也用在酿酒、血液化学及土壤科学等地方，用来指酸度增加，而不考虑其初始状态是酸性还是碱性。一个直接的对照就是描述温度变化的字眼，当温度从0°C增加到5°C，对大部分人来说，仍是很冷的，但我们却称它为“变暖”。



对海洋酸化及温度升高对珊瑚藻的影响进行试验调查。

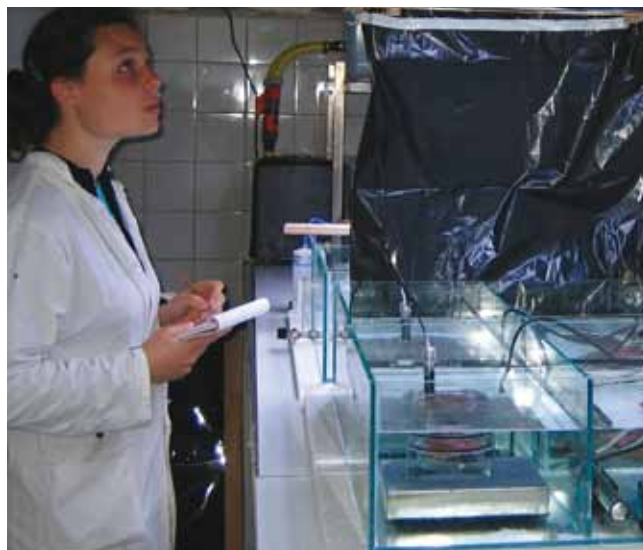


Photo © Sophie Martin (CNRS)

从局部来说，有多种因素可以影响CO₂与海水的化学反应，并左右例如，在近海海域可能发生的酸雨，其中含有化石燃料燃烧产生的硫酸和硝酸。酸雨的pH值介于1和6之间，可能对局部海水表面的化学性质产生重大影响，但从全球尺度来说，影响却非常小。沿海海域还受过度营养盐输入的影响，其源头大都来自于氮肥、化肥和污水。由此产生的富营养化导致浮游生物大量繁殖，而当这些生物死亡沉到海底后，被海底细菌所分解，细菌的呼吸作用导致海水中氧气被大量消耗，CO₂增加（pH值下降）。

海洋酸化真的发生了吗？

很高的确定性

我们非常确定大气中 CO_2 的增加导致了海水化学性质的变化，而人类活动则是其发生的根源。

世界各地的详细测定数据提供了最有力的证据，例如，夏威夷附近的太平洋海域20年的数据记录（如图所示），尽管季节变化有很大的波动性，但可以明显看出表层海洋中溶解的 CO_2 不断升高及pH值下降的趋势。这一变化和大气中 CO_2 的变化曲线非常吻合。我们可以看到，自工业革命前至今，pH值下降了约0.1，由于pH值是对数，氢离子浓度实际上已增加了30%。

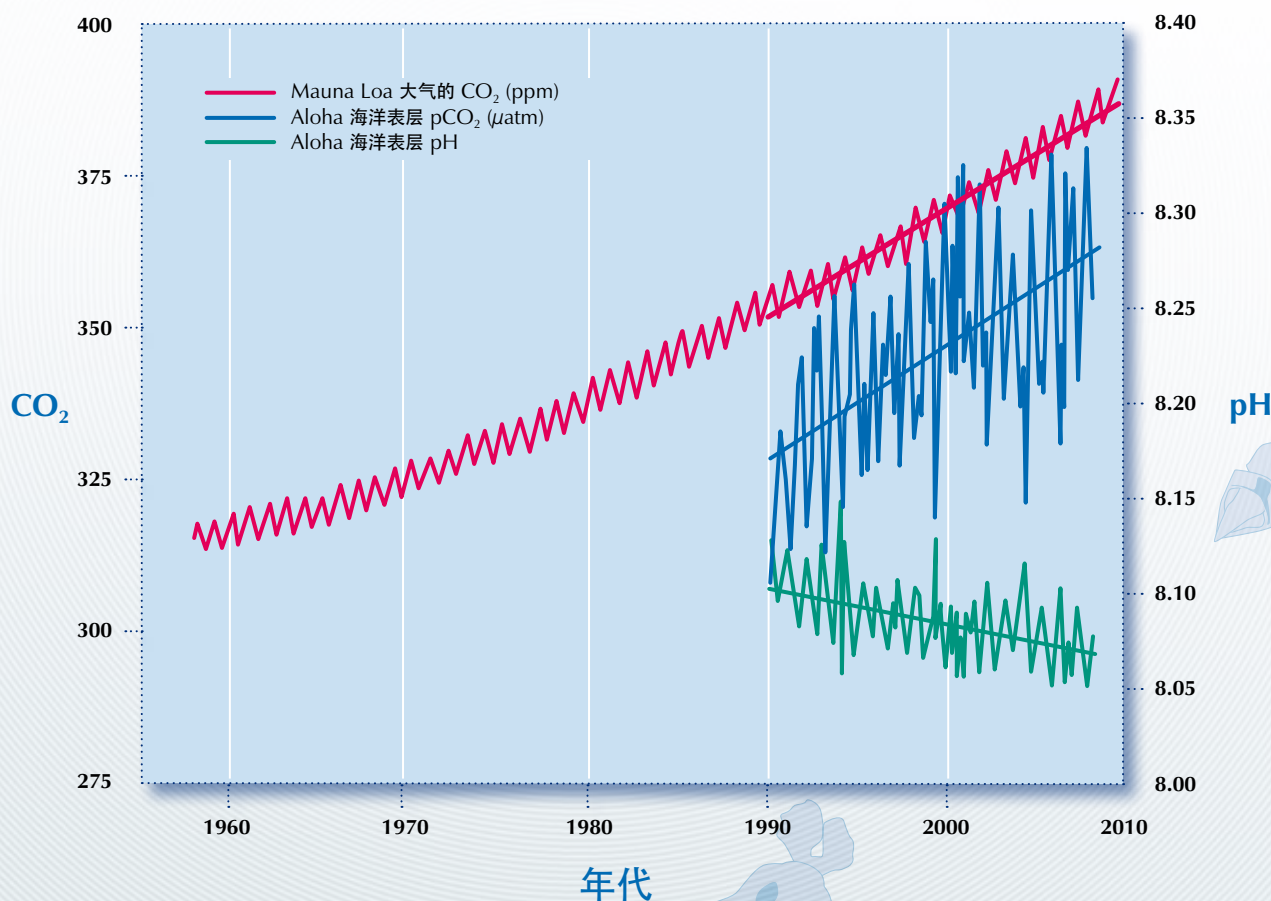
通过计算机精确地对最近的人为 CO_2 排放进行模拟，观察到了海水pH和碳酸盐的降低（见上图）。我们相信没有任何其他原因可能导致这一全球性的影响。



Photo © Christopher Sabine

美国国家海洋和大气局（NOAA）位于太平洋中的一个观测站曾测量过 CO_2 通量。

莫纳罗亚山（Mauna Loa）大气中 CO_2 时间序列数据，及太平洋阿罗哈（Aloha）站位的表层pH及 pCO_2 数据。Source after Feely et al., *Oceanography* (2009).



不同的海洋，不同的速率

海洋酸化将在每个地方发生，但由于温度和循环途径的不同，它在不同地方发生的速度和产生的影响也不同。目前碳酸盐的水平可以保持外壳、骨骼等碳酸钙结构的完整（过饱和状态），低于这个水平意味着这些“硬”的结构将开始溶解（欠饱和状态）。模型推测结果显示，北极洋将首先超越这个与海洋酸化密不可分的化学界限，海水碳酸钙将从“过饱和”变为“欠饱和”状态。

如果大气及海洋中的CO₂浓度仍以现在的速率增长，到2018年，北极洋的十分之一将超过这一界限，到2050年这个数值将上升到三分之一，到2100年可能整个北极洋都将处于可溶解碳酸钙的状态。

非常确定的是，大气中CO₂的升高将导致海水化学构成的变化，而人类活动是其根本原因。



Photo © Ulf Riebesell, IFM-GEOMAR

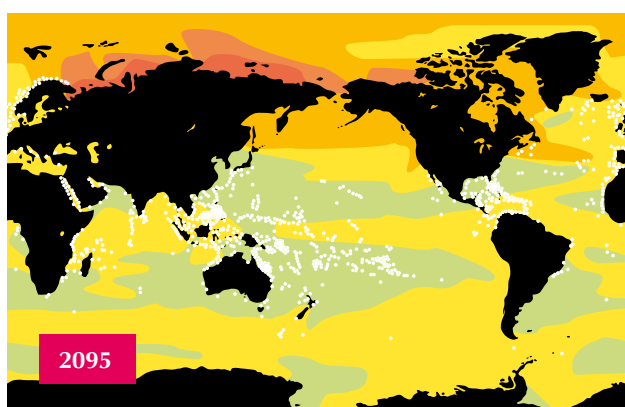
在斯瓦尔巴特群岛（Svalbard）外北冰洋高纬度区，欧洲海洋酸化研究计划的科研人员利用中尺度生态系统开展CO₂加富实验。



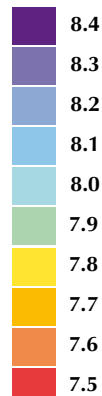
Photo © Jean-Pierre Gattuso

中尺度试验对了解生物群落和生态系统水平上海洋酸度的含义意义重大。

国家大气科学研究中心区域气候系统模式3.1 CCSM3, 以十年尺度分别模拟了在1875, 1995, 2050 和 2095年海洋表面的pH平均值。 Source after Feely et al., *Oceanography* (2009).



pH



珊瑚礁

Photo © MNCR/SNH



经检测，普通的海胆 *Echinus esculentus* 体壳中含有方解石。

方解石和文石

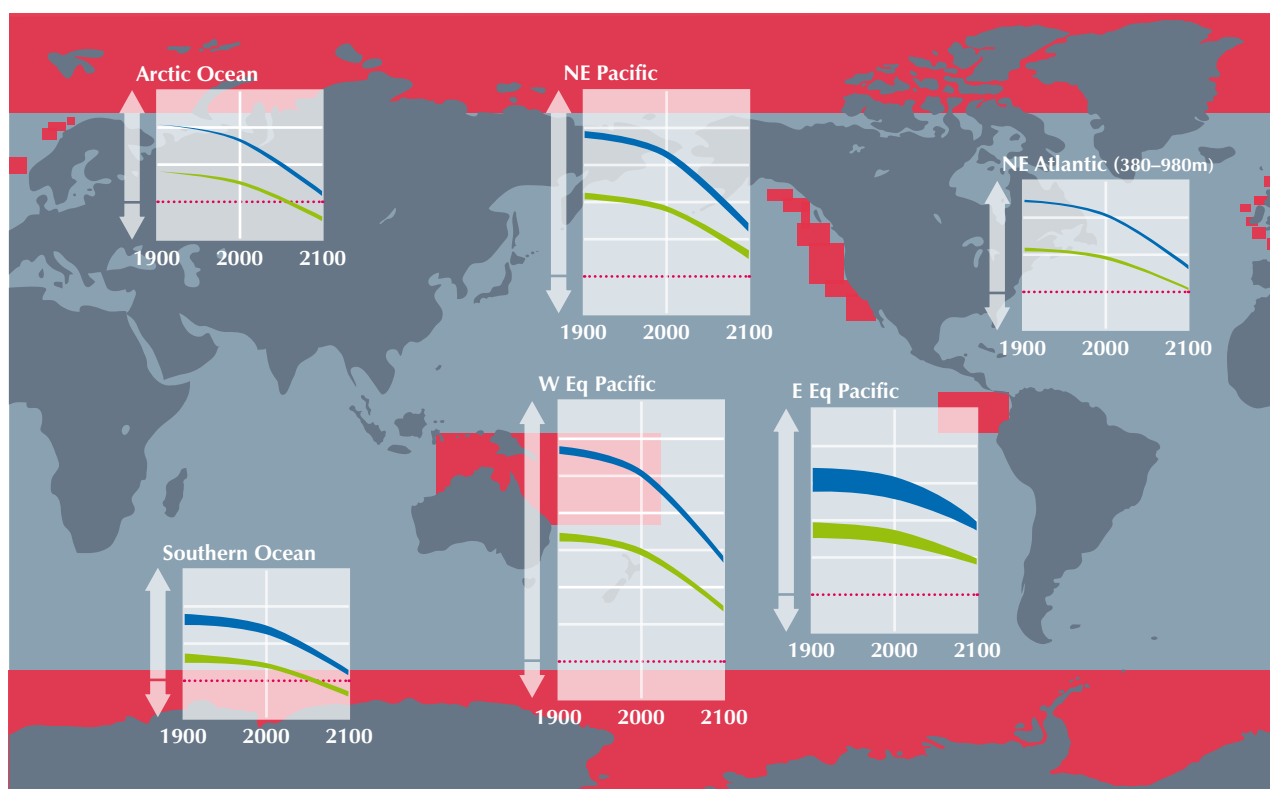
方解石和文石是两种不同形式的碳酸钙。方解石是在颗石藻、有孔虫、棘皮动物以及一些软体动物的外壳中发现的一种碳酸钙，较难溶解。文石是相对更易溶解的一种碳酸钙的形式，存在于珊瑚，大部分软体动物（包括可自由游动的翼足类动物，小浮游海螺）和一些藻类中。



翼足目筒螺 *Cuvierina columnella* 的体壳为文石。

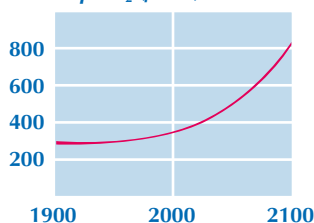
Photo © Hopcroft/UAF/COML

对历史及将来海洋化学变化的预期，使我们认为 CO_2 的释放将一如既往。地图坐标显示，碳酸盐饱和状态的区域有六个（红色部分）——在红色水平线之上表明过度饱和的状态，之下表明文石与方解石均未达到饱和。饱和线的厚度表明季节的范围。全球海洋表面大气 pCO_2 ，pH，文石与方解石的饱和度的平均值在右下角标注。Source after Turley et al., Marine Pollution Bulletin (2010).

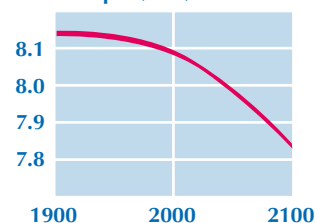


— 方解石
— 文石

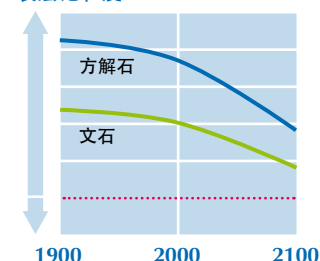
大气的 pCO_2 (μatm)



海洋表层 pH (SWS)



表层饱和度



饱和线

海洋的深层冷海水通常处于碳酸根离子不饱和状态，使得大部分钙化生物钙质被溶解。表层海水处于碳酸根离子过饱和状态，不能溶解钙壳，在过饱和与不饱和的过渡地带，则称为“饱和线”。在此界线之下，碳酸钙便开始明显溶解。有些生物在饱和线下仍能生存，是因为他们体内拥有特殊的机制，阻止了碳酸钙的溶解。随着海洋酸化的加剧，水体的饱和线越来越浅，将使越来越多的钙化生物暴露于欠饱和的水体中，导致它们的钙壳和骨骼溶解。相对文石来讲，方解石的饱和线位于较深层，但是自1800年以来，两种钙质的饱和线向上移动了50-200 m。



Photo © Karen Hismann, IFM-CEOMAR

石珊瑚，如白珊瑚 *Lophelia pertusa*，利用文石构建它们的骨骼，对饱和度的升高相当敏感。柳珊瑚（红珊瑚）利用方解石构建其骨骼。

海洋酸化及碳在海洋系统中的长、短期转化

从长时间尺度来讲（>10万年，地球吸收和释放 CO_2 会有一个自然的平衡， CO_2 自然产生的主要来源是火山，植物有机物质的生产和陆地上的岩石风化又将其吸收。但是，岩石风化需要上万年的时间，并不能足够快地移除目前人类活动释放到大气或被海洋吸收的 CO_2 。从较短的时间尺度（>1,000年）来讲，对于潜在的碳酸盐富集，海洋有一个与海洋碳循环相关的内部平衡反馈，链接海洋碳循环与碳酸盐丰富的底层沉积物，即所谓的“碳酸盐补偿”。

碳酸钙在表层海水是过饱和的，因此很少被溶解，但是深层海水是欠饱和的，很容易溶解。这两种状态之间的第一个分界线是溶解界面，在溶解界面以下溶解作用显著增强。在浅水层，大部分碳酸钙长年被埋藏在沉积物中；钙化生物死亡后，其外壳（碳酸钙）沉降到深海海底，几乎



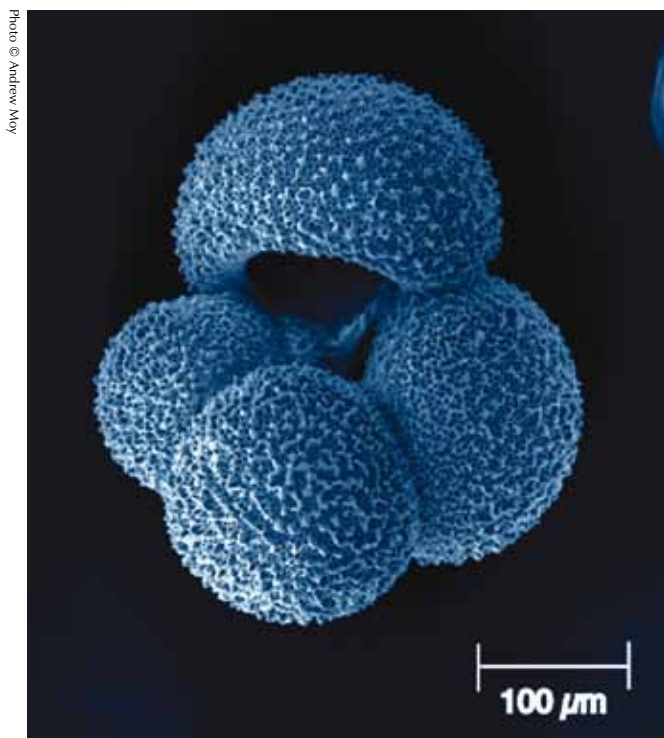
Photo © Deep Atlantic Sleeping Stones Science Team IFE UR/NOAA

海床沉积物是碳酸钙沉积的作用。

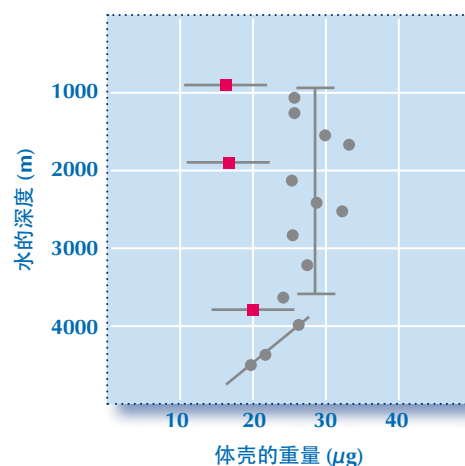
全部被溶解；因此，千百万年来 CO_2 都未能被储存起来。

目前大气 CO_2 向海洋溶入速率的增加，导致了碳酸盐补偿深度（CCD）的失衡，在这个深度以下所有的碳酸盐都可能溶解。随着海水pH的下降，导致溶解界面和CCD变浅，使得越来越多埋藏在沉积物中的钙壳暴露在欠饱和状态，进而溶解，这将减缓海洋酸化速率，但需要上千年的时间。

从南极洲的一个分支水柱沉积物捕集器中发现的浮游有孔虫 *Globigerina bulloides*, 其骨骼由方解石构成。



类) 钙壳的变薄令人忧虑。翼足类在南极的食物链中发挥着很重要的作用, 包括鱼类在内的许多生物以它们为食。有孔虫和翼足类均可将大气中的碳长期储存到深海, 直接的途径是它们死后碳酸钙的外壳落入深海, 间接的途径是它们的外壳可以作为压舱物将其它动物尸体中的有机碳带到海底。

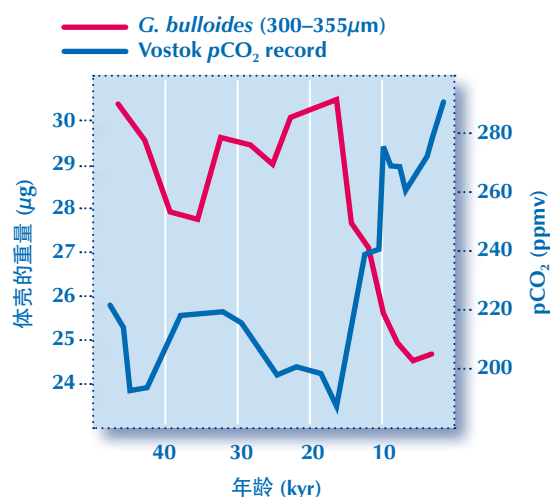


纬度越高, 浮游生物越轻?

人们推测文石欠饱和 (开始溶解的化学态) 将于2030-2070年在南大洋中发生。室内实验和直接的观察显示, 在这之前, 碳酸根离子的降低将导致很多生物难以产生或保持其钙质外壳。从南大洋的采样中发现, 目前有孔虫类的外壳比工业革命前轻了30-35%; 随着CO₂排放量的持续增加, 有孔虫 (比如泡抱球虫) 和外壳由易溶解文石组成的浮游物种 (例如翼足

从高于方解石饱和度水平 (红色区域) 的各个深度收集的浮游有孔虫 *Globigerina bulloides* (300-355 μm) 与工业化之前沉积物 (灰色圈内) 中的个体对比, 其体壳的平均重量要轻。

Limacina helicina antarctica 在2008年国际北极年 (IPY) 之东南极海洋生物普查合作 (CEAMARC) 航次中, 一个的活体翼足目南极蟠虎螺由考察船Umitaka Maru 捕获。



浮游有孔虫 *Globigerina bulloides* 体壳的重量, 在大气CO₂水平最低时最轻 (~18,000年以前), 在今天大气CO₂水平最高时, 其体重最低。

对美洲西海岸未饱和态较深水域上升流之影响已经显现。



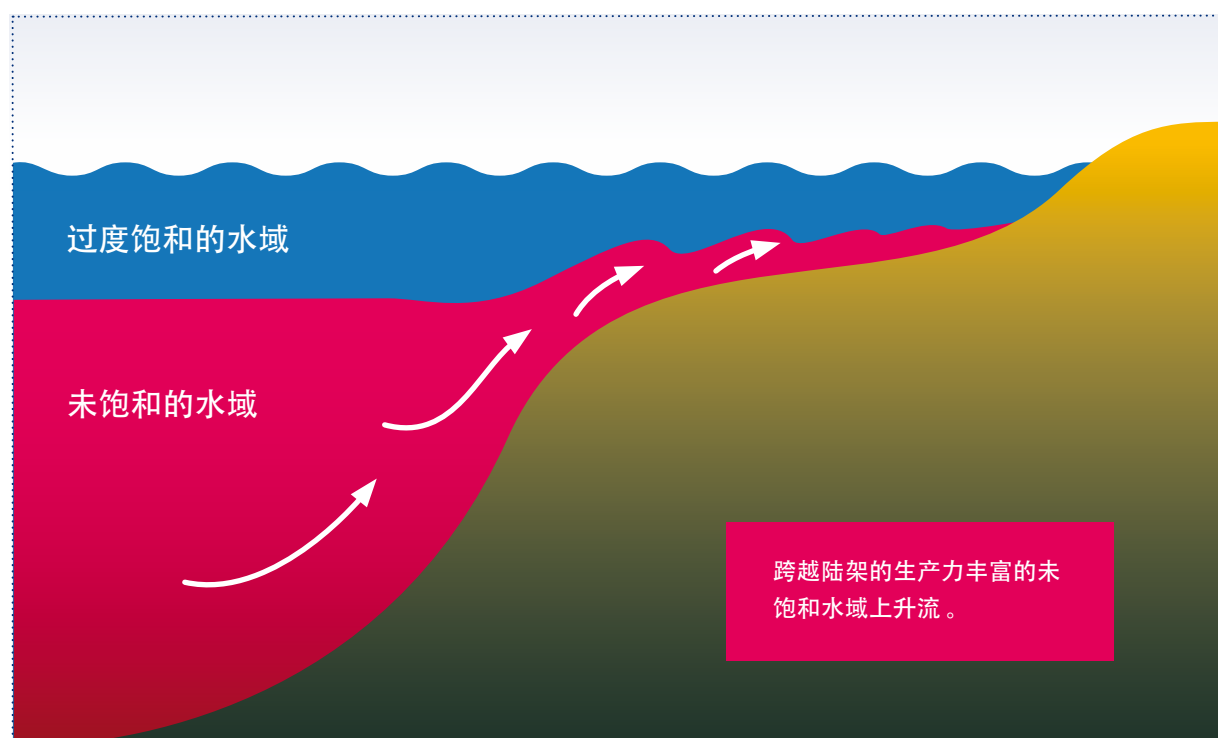
海洋问题浮出水面

沿岸地区周期性地经历上升流，上升流可将深海中的冷水带到大陆架和沿岸，给具有生产力的表层海洋带来更多营养盐和 CO_2 。

海洋酸化将使海水碳酸钙过饱和层变浅，这些自然发生的上升流可以使欠饱和的海水上

涌到表层及岸边。沿岸的海洋钙化生物无法习惯这周期性的变化，其种群结构可能改变。目前欠饱和海水的上升流已在北美的西海岸发生，也可能将在条件允许的其它地区发生。

不饱和态水域的季节性干预已经对重要的渔业，如牡蛎的养殖，产生了严重的影响，这已在北美西海岸发生。Source after Carol Turley based on Feely et al., *Science* (2008).



历史的教训

地球上海洋的化学过程不是一成不变的，在遥远的过去发生过多次海洋酸化事件。那么我们可以从这些发生过的酸化事件悟到什么呢？同时，我们是否可以依据当前海洋酸化的种种表现来预测其引起后果的严重性呢？

以往的海洋酸化事件能启示我们什么？

地球的近期历史中，海洋的酸碱平衡是相对恒定的。科学家能从这一点间接地推测古代海洋的酸碱度，也可通过冰团中的气泡推算得知；再者，利用冰川和沉积物中的记录也能得知过去的情况。

对不同深度 (palaeodepth) 南大洋深海水样研究表明，在古新纪-始新世极热时期 (PETM)，方解石饱和岩层形成超过2千米的堆积只要几千年，然后需要大概10万年恢复到PETM之前的水平。这一事件对目前底栖有孔虫类大量灭绝可能深有影响。
Source after Zachos et al., Science (2005).

冰川中捕获的气泡是对过去大气情况的重要记录。



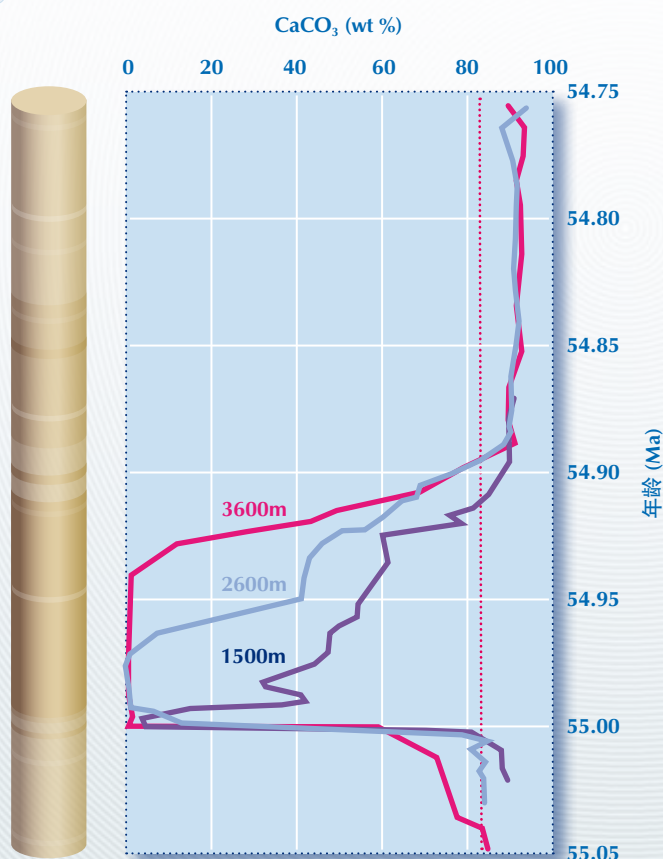
冰的历史记录

困在冰层中的气泡可以反应过去的大气 CO_2 水平，据此可计算出过去海洋的酸碱度。柱状萃取冰可以像树木的年轮一样解读：上层反应最近的情况，底部的沉积层则反应很久以前的状况。对柱状冰的研究显示，从80万年前到公元前19世纪中期，大气中 CO_2 的水平从未超过280ppmv，海水的pH是8.2。目前大气中 CO_2 的浓度大约是390ppmv，海洋表层海水pH是8.1。

古今的类比

回望历史，在很长一段时期海洋的pH值都低于现在的水平。我们能从以前的事件中得到什么启示呢？人们最常提及的事件，是发生在5500万年前的新生纪（古新世-始新世极热事件，PETM）。地球史上这一戏剧性的事件导致全球的温度在1万年内上升了6°C，海平面也随着海洋变暖而上升。大气 CO_2 浓度上升，使得碳酸钙饱和层变浅。这个事件可能是由于海洋变暖，氧化了海水中的碳，生成 CO_2 并释放到大气中。

这个事件可帮助我们理解将来会发生什么。尽管很多底栖的钙化生物已经灭绝了，但是一些人认为在表层生长的物种熬过了5500万年前的那种环境，它们也会在目前发生的海洋酸化事件中安然无恙。这种断言的危险之处在于它忽视了PETM时期和现在的根本不同之处：这些海洋酸化事件发生的时间跨度不同。在PETM时期发生的海洋酸化事件跨越了1万年，



而今天的海洋酸化仅是几个世纪的事情。尽管目前发生得还比较慢，但已经对深海的生物产生了影响，发生得越快意味着生物适应的时间越短。

程度的差异

为什么我们要将目前的状况与历史区分开呢？因为相对于大气 CO_2 水平的快速变化来说，地质过程吸收大气 CO_2 则非常缓慢。最主要的不同点是，在最近6500万年中发生的所有海洋酸化事件中， CO_2 是通过几千年甚至几十万年火山活动缓慢溶入海水的。海洋有充裕的时间将这些千年尺度的表层海水循环至深海，然后再回到表层，使海底碳酸盐沉积物溶解，并释放碳酸根离子，使部分酸性得到中和。几百万年前的海水含有比现在浓度高得多的钙、镁离子聚合物，这有利于海洋生物骨骼中的碳酸钙保持稳定，与现在的海洋状况相比，能够更好地适应酸化。

现在，海洋混合引起大气 CO_2 向海洋溶入的速率远远小于大气 CO_2 浓度上升的速率，使得这两种过程处于失衡状态，从而使海洋吸收的大部分 CO_2 积聚在表层海水。人类排放 CO_2 的50%停留在占海洋10%的表层。沉积物调节海洋化学结构和中和酸度均需要1000年以上的时间，能力太低，速率太慢，因此海洋酸碱度和碳酸根离子浓度都在下降。

在有些地区的珊瑚礁，如赛舌尔 (Seychelles)，蕴藏了极为丰富多样的生命，如果当前的海洋酸化速率继续的话，到2050年，将对这些生命产生极大的影响。

过去是否能对未来有所指示？

我们可以把现在正在发生的事件与几百万年前海洋更酸的时期进行对比。如今的酸化，比起化石记录的过去6500万年间发生的任何酸化，速度更快，程度更剧烈。据估计，现在的海洋酸化比5500万年前的古新世—始新世最热时期酸化速率快十倍，那是恐龙灭绝以来最大的海洋酸化事件。大西洋东南部的海底柱状沉积物显示，由于钙化生物的溶解，沉积物组分发生巨大变化，只剩下红粘土。这是因为酸度的增加使得许多拥有钙质外壳的深海生物灭绝，导致海洋的成分构成起了剧烈变化。从海底柱状沉积物观测，海洋花了至少十余万年才得以恢复。

快十倍

纵观地球历史，海洋生命经历了无数次的突然灭绝，适应并进化成新物种，但是灭绝和重生的时间尺度不是几百年，而是上百万年。人类活动驱动的海洋酸化正在影响着海洋，其变化比地球自然恢复的调节速率快得多。如今的海洋酸化速率，与6500万年前恐龙灭绝以来所记录的任何酸化事件相比，至少要快十倍。



Photo © Jaffer Tammar

海洋酸化的速率比5500万年前许多海洋物种灭绝的时期要快10倍。

我们可以预测海洋酸化后果的严重性吗？

大气中 CO_2 水平将不可避免地从现在的391ppmv继续升高，海水表层的pH将会继续下降。然而，大气 CO_2 上升的速率和程度很难预测，因为这取决于我们是否能够减少 CO_2 的排放以及减少的数量。如果大气中 CO_2 持续增加的话，到21世纪末其浓度将达到800 ppmv，海洋pH将进一步下降0.3-0.4个单位，相当于氢离子浓度升高150-200%。

然而，因为我们从未经历过这种变化，并且不同种类海洋生物对酸化引起的海水化学变化敏感性不同，以至于我们不是很确定海洋酸化的生物学效应。

终生的影响

对于许多海洋生物而言，海洋酸化会不同程度地影响它们的受精体、幼虫时期、青年时期和成年体，因此认识酸化对生命生存和繁殖的影响十分重要。总的说来，研究发现，生命的早期（受精体、幼虫时期、青年时期）对海洋酸化尤其敏感。环境胁迫通常会限制生物

取回南极洲中层水域翼足目动物箱式拖网样品。



Photo © John M. Baxter

的行为，例如：处于胁迫下的生物生长得慢些、身体变小；捕食者和被捕食者的捕食和逃避能力均会下降。对于成年的动物，海洋酸化引起的压力会影响其行为能力，并最终降低其生长和繁殖速率。即使有些个体可以存活，繁殖能力也降低了，后代减少，整个群体的数量进而受到影响。

受到海洋酸化威胁的物种包括热带和深海的珊瑚、钙化浮游生物及自由游动的翼足目动

珊瑚——复杂的问题

珊瑚中共生的微小的单细胞藻类叫做虫黄藻，它通过光合作用为珊瑚提供碳源。珊瑚虫与该藻的关系存在微妙的平衡，如果虫黄藻长得太快，随着数量的增多，向珊瑚宿主的碳转移将发生混乱。因此高浓度 CO_2 虽然可以促进虫黄藻的光合作用，但对宿主来说，却不一定是个好消息。尽管在700-800 ppmv CO_2 条件下一些藻类的光合作用会被促进，但是对虫黄藻却没有显著提高。有关实验表明大多数情况下高 CO_2 降低了珊瑚的钙化速率，因此 CO_2 浓度的上升实际上降低了珊瑚构建自身骨骼的能力，也因此降低了珊瑚礁抵御外界风暴的能力。这意味着珊瑚礁的生长速度最终将低于其自然腐蚀的速度，并将消亡。



Photo © Dan Lafoley

珊瑚礁是重要的，但同时是极其脆弱的生态系统，对海洋酸化尤敏感。

龙虾的故事

有实验表明，在培养60天后，几种甲壳动物壳的重量随着CO₂浓度的升高而增加，但是另有实验显示，龙虾幼体壳的生长在高CO₂浓度下会降低。这说明了研究生物生命周期及其生理生态健康的必要性。断言甲壳动物在海洋酸化条件下能够安然无恙，还为时过早。这体现在两个方面：

1) 造壳需要能量，但是每个生物体能量开支都有限。在造壳上增加能耗，必然会降低其他功能的能量需求，比如说生长和繁殖。以上研究并未考虑这些因素，因此海洋酸化对这些生物健康和寿命的影响还属未知。

2) 龙虾有不同于软体动物和珊瑚的外壳及生长机制。龙虾的壳是外骨骼，除了碳酸钙之外还含有大量的角素，它们不是不断增加壳的厚度，而是周期性地蜕皮，当龙虾蜕皮时，会从旧壳体中移除大量的矿物质，保存在体内，用于新壳的合成。

目前还不清楚这个不同的生长机制是否会影响其对海洋酸化的响应。



龙虾。

珊瑚藻 (如 *Lithothamnion topiiforme*)，可能是对海洋酸化最为敏感的生物之一。



Photo © Armin Form, IFM-GEOMAR

物，在酸化胁迫下其钙化骨骼的形成受到阻碍。这些生物均在海洋中扮演着重要的角色，例如珊瑚礁构成一个三维的框架，多种生物居住其中，还扮演着海岸保护网的角色；还有些生物是海洋食物链及海洋生物地球化学循环的关键组成部分（如含碳酸钙的浮游生物及翼足目动物）。

孰胜孰败

有些浮游植物及植物种类的生长与光和作用水平可随着CO₂水平的升高而增加，但这并不是一成不变的规律。对其它种类，高浓度的CO₂和酸度的增加将有可能对其生理产生负面影响，或不产生影响。因此，在海洋酸化状态下，某些海洋植物是“胜者”，有些则是“败者”，而另一些则“无动于衷”。迄今研究表明，将来酸化了的海洋中占优势的新生浮游植物和植物种类可能不足以支撑我们目前依赖的多产和丰富的食物链，因此难以支撑健康的海洋生态系统，也难以为我们提供丰富的渔业资源。

后果



茂盛的海草在低pH海水中失去了附着生物。

有关人类行为和海洋生态系统对海洋酸化的响应，还有许多未知，因此很难精确地预测海洋酸化的后果。然而我们可以通过历史推测可能的后果，我们也可以观察海洋中受制于自然界长周期酸化影响的区域。

人类在海底冷水火山口（不是炙热的深海火山口）发现有海洋生物群落存在。该区域的pH值比人们预测的还低，其生物群落中有微藻类、海藻和海草等，生长得很好，但与pH没有下降的其它类似区域的生物相比，其整体的生物多样性下降，钙化外壳受侵蚀非常明显。

物种难道不能轻松地适应海洋酸化吗？

随着海水pH和碳酸根离子浓度持续下降，海洋生态系统必然会出现“胜者”与“败者”，海洋生物群落结构会不可避免地发生变化。最先受影响的很可能是含钙壳或钙质骨骼的动植物。生物对环境恶化的响应可为如下三种情况之一：适应、进化（变异以适应）或灭绝。

没有附生植物长满茂盛海草的海床，在自然状态低pH值海水中很繁盛政府间气候变化专门委员会（IPCC）2007 预测的年大气CO₂ 浓度与海洋表层pH下降，显示了一些实验预测的生物学效应以及第一个本地化季节性文石不饱和状态发生的年代。Source after Turley et al., Marine Pollution Bulletin (2010).

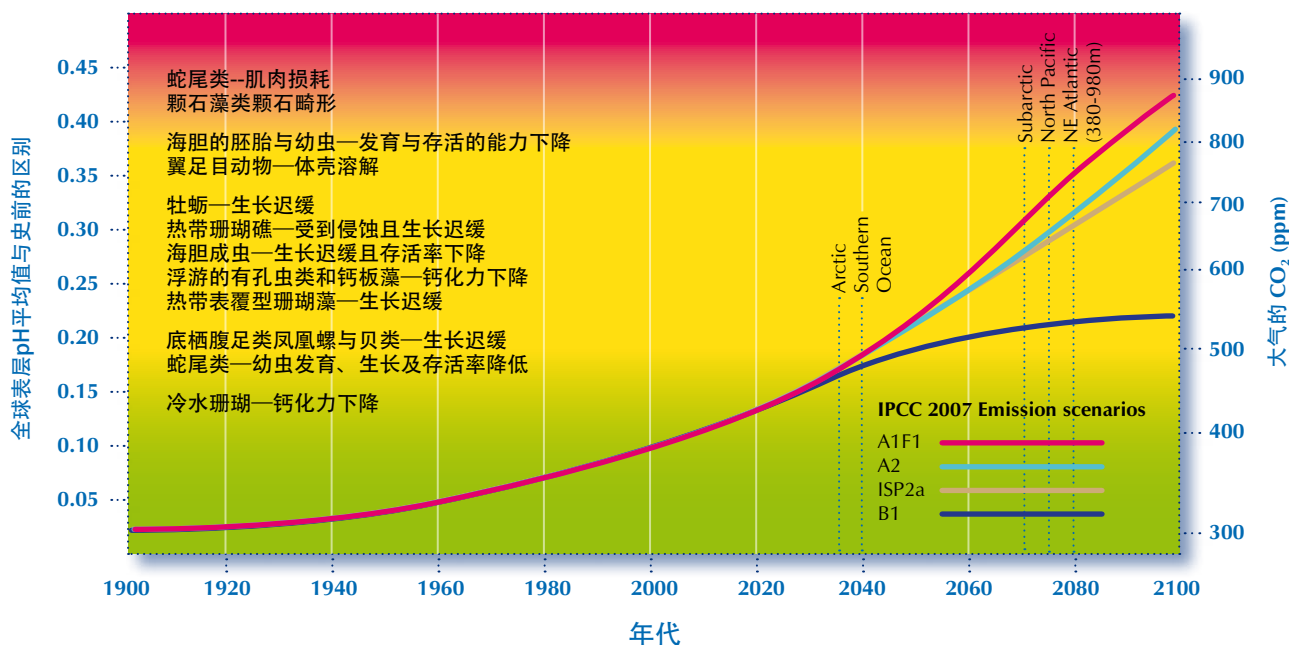




Photo © Jason Hall-Spencer

pH值与碳酸盐水平的持续下降将导致“成者”与“败者”的出现——但是变化是不可避免的。

火山口的CO₂ 气泡使得地中海海床的生物群落成为研究海洋酸化的理想天然实验室。

自然界中的高浓度CO₂实验室



大多数物种拥有适应环境变化的能力。所有的物种对环境改变都有一定的耐受力，尽管由此产生的压力可能影响它们在环境中的竞争力。一种生物的本质行为取决于其能量的收支

平衡。如果一种生物在维持和保护其甲壳或骨骼上花费更多的能量，则在其它重要功能如生殖或生长方面就会精力不足。如果非甲壳类生物在高CO₂、低pH的海洋中花费更多的精力呼吸和排出废弃物，在猎食或其它重要生存活动中，它的精力就大为减少。



自然界高CO₂浓度区域被严重腐蚀的帽贝的体壳。

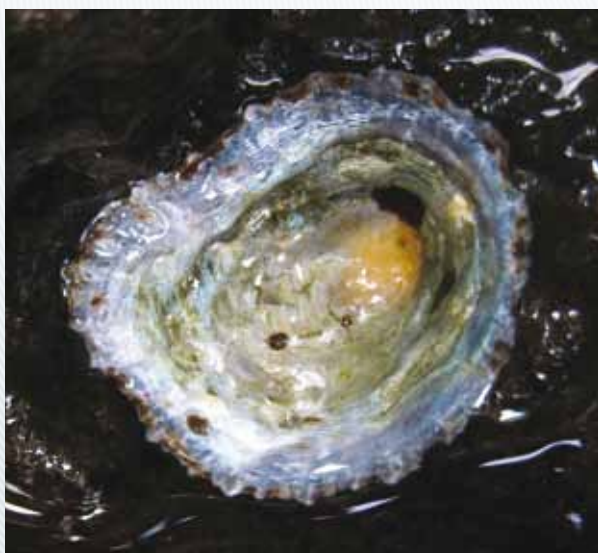


Photo © Jason Hall-Spencer

引种于自然低pH值区域的珊瑚虫，其钙质的骨骼有腐蚀现象。

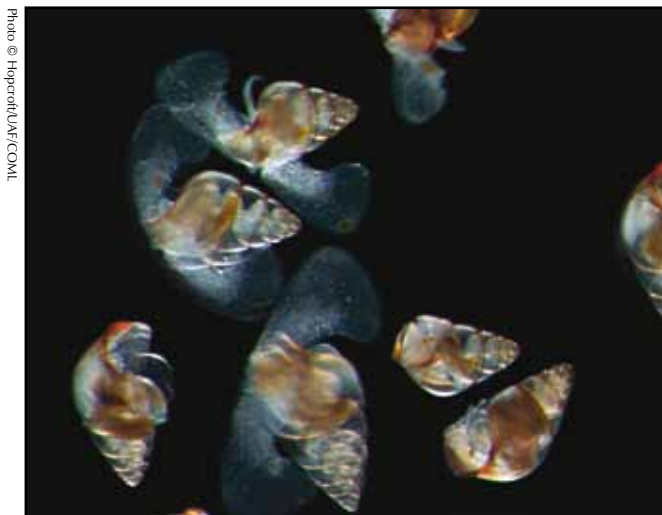
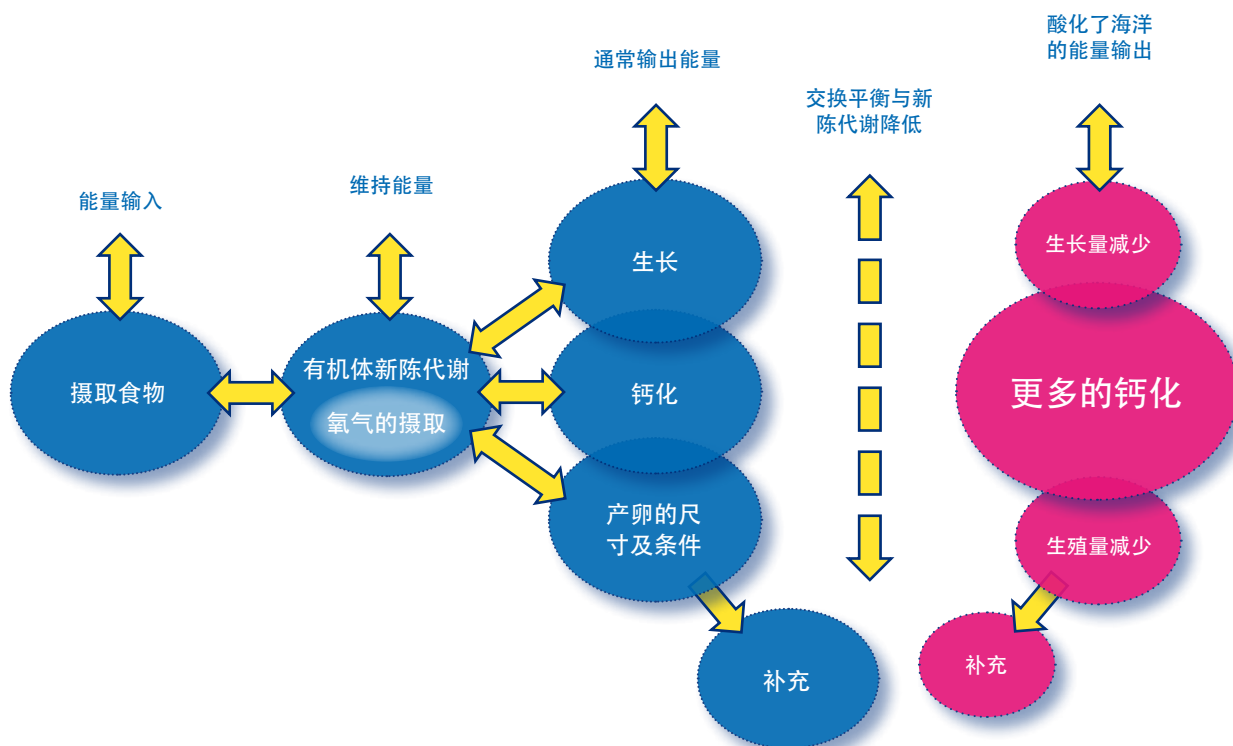


Photo © Jason Hall-Spencer



关键生存过程—海洋酸化将如何影响生物的整体生理机能？

Source after Carol Turley.



热带翼足目泡螺 *Limacina bulimoides*。

变化的速度

较小的基因变异会使得某些个体对新环境更适应，从而使其适应环境变化。短寿命的物种对环境的快速变化有更强的潜在适应能力；这是因为其繁育时间短，新一代经历的环境只与上一代稍有不同，并且大量的个体可以产生有用的变异。相比之下，生命周期长的物种快速适应环境变化的能力则较弱。然而，通过对生命周期为一年的翼足目动物的甲壳厚度之研究表明，即使对生命周期短的生物来说，目前的海洋酸碱度变化的速度也快得让它们无法适应。这一点尚需更多的研究来佐证。

在以前的地质记录中，酸化事件常常与许多物种灭绝有关。同时，此类的灭绝事件原因常常很复杂。值得注意的是，生物灭绝事件发生以后，恢复起来却需要几十万或几百万年。

这是酸化竞赛吗？

关键问题不是海洋生命能否对海洋酸化做出适应并进化。值得质疑的是，面对如此快速的海洋酸化，海洋生命是否具有适应并快速进化的能力？产生的新生物群落是否能够提供人类需要的各项益处和服务？

跟上变化的步伐？

目前珊瑚礁分布的证据表明，珊瑚已经适应了几百万年来的低碳酸盐饱和状态，但是仍未跟上环境变化的步伐，它们不可能适应未来几十年内环境的快速变化。

明白我们的选择

海洋酸化的影响正在扩大，尽管目前出现的影响相对较小，但这种影响将会随着酸化速率的增大而逐渐增长。不仅如此，CO₂排放与水气间达到平衡状态之间存在一定滞后，所以，即使排放得到控制并减少，海洋的pH在一段时期内仍将继续下降。如果我们想切实阻止海洋酸化，关键是要降低大气中CO₂水平。

化石燃料的使用持续增加大气中CO₂水平。



减少CO₂排放会有不同么？

在过去的250年中，CO₂水平从280 ppmv到如今的391ppmv，已经增加了40%，并且每年将继续以2%的速率增长。由于海洋吸收CO₂（导致海洋酸化），大气中CO₂水平才得以保持适中，否则今天的CO₂水平将达到450 ppmv左右，也必然会引起更加剧烈的气候变化。

可以逆转

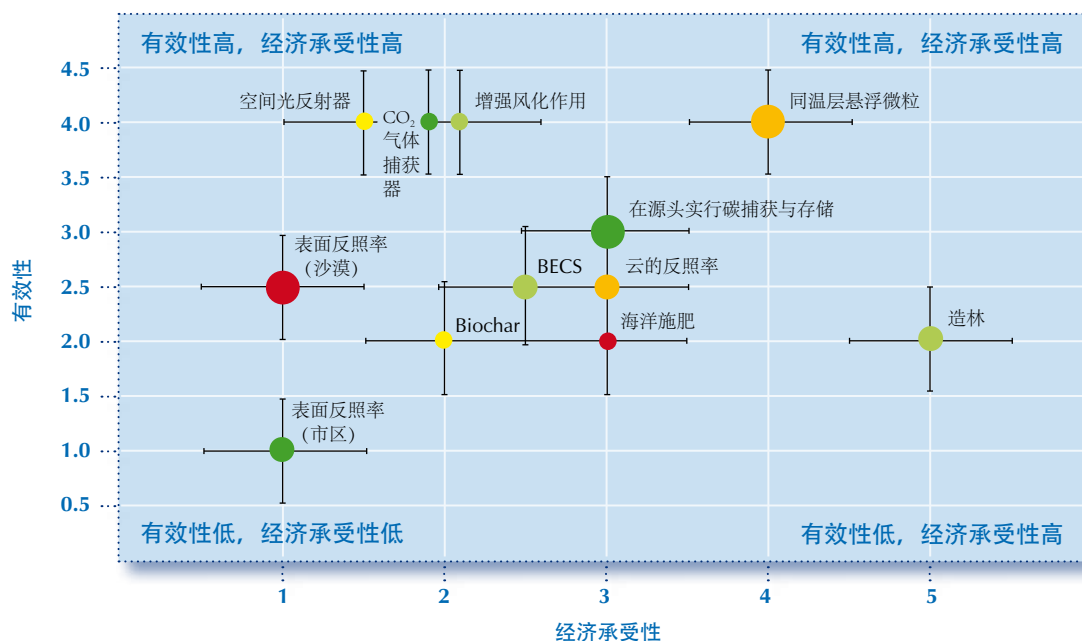
大气CO₂溶入海洋，导致海水化学发生变化并对海洋生态系统产生影响，这些变化从长时间尺度来看是可以逆转的。然而，这种逆转取决于大气中CO₂水平长期而显著的下降。降低燃烧化石燃料和水泥生产排放的CO₂，并减少森林砍伐等是唯一现实的办法。

大气中CO₂浓度达到高峰的水平预计为刚好超过400ppmv，对海洋pH的影响会在大气中CO₂水平下降后仍持续相当长的时间。在接下来的几个世纪，表层海水吸收的CO₂将持续渗透入深海。

停止森林砍伐有助于降低大气中CO₂水平的增长速率。



当前有几种地球工程的方法，可以降低大气CO₂增长的速率，很有效而且能够负担得起。只有碳捕获与储存（CCS）对大气CO₂水平有些影响。红色的点表示高风险，绿色的点表示安全些的选择；点的尺寸代表及时性（如果是可以快速实行并且有效的就大；反之就小）。黑色的条表示对经济承受性（水平的）和有效性（垂直的）的不确定程度。Source after The Royal Society *Geoengineering the Climate* (2009).



海洋可持续性能源技术的发展对降低由化石燃料燃烧释放的CO₂很重要。

Photo © John M Baxter



犹未为晚

即使在未来几年中采取措施快速减少大气中的CO₂，海洋酸化引起的变化也不会消失，且这种变化会越来越多。然而，努力遏制酸化的恶化还不算太晚。目前显著降低CO₂排放的技术和经济条件已经具备。人类开始行动得越晚，最终的影响就越大，海洋酸化产生的后遗症就会持续得越久。

“地球工程”能够解决海洋酸化吗？

“地球工程”的概念就是对地球的气候进行人为的调控。多数试图缓解气候变化的地球工程方法都没有命中问题的根源——大气中CO₂浓度过高。因此，这些方法不能解决CO₂排放导致的化学变化。例如：利用反射多余阳光到太空中来试图降低地球温度的方法，对海洋化学的直接影响甚小，因此海洋酸化带来的威胁不会减少。

未知后果

通过向海洋中投放化合物来中和酸性，以减少海洋化学变化的提法很多。这些方法最大的问题是，需要添加的物质数量将非常庞大。事实上，通过计算，这一数量将比我们排放到空气中的CO₂量还要大。因此，这些方法将需要新的采矿业和化学加工设施，而环境后果仍属未知。

也有人认为海洋施肥有助于降低气候变化和海洋酸化。海洋施肥会刺激浮游植物的生长，从而使生物对大气中CO₂的吸收有一个净增长。因此降低海洋表层CO₂浓度，将降低海洋表层溶解的无机碳浓度。全球海洋碳循环模型预测，如果向大气中排放的CO₂量不变，海洋施肥会使海洋表面的酸化适度缓解，但却会使海洋深处的酸化进一步恶化，因为下沉至海洋深处的有机颗粒分解会释放出CO₂。由此产生的CO₂增加，深海就会持续酸化。鉴于这种方法的规模和持久性，其费用将难以承受，而真正的益处也极其有限。

预防为主

许多观察家的结论是，应该设法应用地球工程中的资源，来改变我们的能源系统，从源头上阻止CO₂进入到环境中，而不是在其进入大气和海洋后，才试图消除影响。

在线指南

关于本指南，请访问以下网站下载：

<http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/>

什么是海洋酸化资源共享联盟？

对于海洋酸化这个亟待解决的重要事件来说，一个关键的挑战是以事实为依据的科学方案必须快速而有效地进入政策顾问及决策者的手中，以便他们制定相应的措施。海洋酸化资源共享联盟（RUG）反映了英国、欧洲乃至国际上科学家与决策者之间信息交流的经验。

RUG成立于2008年，旨在支持关于欧洲海洋酸化研究计划，并已扩大到英国和德国，支持互补性的研究，同时与美国的类似机构有着密切的联系。RUG吸收了大量成员，支持杰出的科学家们对海洋酸化的研究，促进知识的快速传输和高质量科学的高效传递。

本指南借鉴了RUG的经验和海洋酸化研究杰出科学家的知识，旨在为政策顾问和决策者在解决这个棘手的问题时提供科学依据。

海洋酸化资源共享联盟由以下代表组成：

Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research, BP, Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CNRS), Canadian Tourist Industry Authority, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Climate Central (Princeton University), Conservation International, Directorate of Fisheries (Norway), Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Greenpeace, International Atomic Energy Agency, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), International Union for the Conservation of Nature (IUCN), Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Leibniz Institute of Marine

Sciences (IFM – GEOMAR), Marine Institute (Ireland), Natural England, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Plymouth Marine Laboratory (PML), Rolls Royce, Royal Institution, Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR), Scottish Natural Heritage (SNH), Stockholm Resilience Center, The Nature Conservancy, UK Climate Impacts Programme (UKCIP), UNEP World Conservation Monitoring Center, The Worldwide Fund for Nature (WWF).

观察员

European Commission, the UK Marine Climate Change Impacts Partnership, the Oak Foundation, Oceana

联系我们

欢迎访问以下网站

海洋酸化资源共享联盟和欧洲海洋酸化研究计划：

<http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/>

英国海洋酸化研究计划：www.oceanacidification.org.uk

德国海洋酸化的生物学影响计划：<http://www.bioacid.de/>

更多事宜，请邮件联系我们：policyguide-epoca@obs-vlfr.fr



信息来源及贡献者

本指南借用“海洋酸化常见问题解答” www.whoi.edu/OCB-OA/FAQs 的资源，针对37个具体问题做出回答，代表了最新的科学共识。以下科学家对该问答做出了许多贡献。

Jim Barry, Senior Scientist, Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA

Jelle Bijma, Biogeochemist, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany

Ken Caldeira, Senior Scientist, Carnegie Institution for Science, USA

Anne Cohen, Research Specialist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Sarah Cooley, Postdoctoral Investigator, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Scott Doney, Senior Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Richard A. Feely, Senior Scientist, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Helen Findlay, Lord Kingsland Fellow, Plymouth Marine Laboratory, UK

Jean-Pierre Gattuso, Director of Research, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France

Jason Hall-Spencer, Marine Biology Lecturer, University of Plymouth, UK

Michael Holcomb, Postdoctoral Research Associate, Centre Scientifique de Monaco, Monaco

David Hutchins, Professor of Marine Environmental Biology, University of Southern California, USA

Debora Iglesias-Rodriguez, Lecturer, National Oceanography Centre of the University of Southampton, UK

Robert Key, Research Oceanographer, Princeton University, USA

Joan Kleypas, Scientist III, National Center for Atmospheric Research, USA

Chris Langdon, Associate Professor, University of Miami, USA

Daniel McCorkle, Associate Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

James Orr, Senior Scientist, Laboratory for the Sciences of Climate and Environment, France

Hans-Otto Pörtner, Professor, Alfred Wegener Institute, Germany

Ulf Riebesell, Professor for Biological Oceanography, Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR, Germany

Andy Ridgwell, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Christopher L. Sabine, Supervisory Oceanographer, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Daniela Schmidt, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Brad Seibel, Assistant Professor of Biological Sciences, University of Rhode Island, USA

Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Steve Widdicombe, Benthic Ecologist, Plymouth Marine Laboratory, UK

Richard Zeebe, Associate Professor, University of Hawaii at Manoa, USA

质量保证

此外，我们非常感谢以下人员对本报告的发展提出了具体的建议和意见：

Jelle Bijma, Biogeochemist, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany

Humphrey Crick, Principal Specialist - Climate Change, Chief Scientist's Team, Natural England, UK

Sarah Cooley, Postdoctoral Investigator, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Jean-Pierre Gattuso, Director of Research, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France

Lina Hansson, EPOCA Project Manager, Laboratoire d'Océanographie, Villefranche-sur-mer, France

Dorothee Herr, Marine Programme Officer, Global Marine Programme, IUCN, Washington, USA

Michael Holcomb, Postdoctoral Research Associate, Centre Scientifique de Monaco, Monaco

Richard A. Feely, Senior Scientist, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Andy Ridgwell, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Ulf Riebesell, Professor for Biological Oceanography, Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR, Germany

Donna Roberts, Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, Australia

Daniela Schmidt, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Ed Urban, Scientific Committee on Oceanic Research, University of Delaware, USA

Phil Williamson, Science Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

我们也非常感谢以下单位和个人为本指南提供了多种语言的翻译版本：

Arabic: Haifa Abdulhalin, edited by Nashat Hamidan and reviewed by Khaldoun Alomari.

Chinese: Vera Shi, Hui Lui, Guang Gao and Kunshan Gao.

French: Stéphanie Reynaud, Eric Béraud, François Simard and Jean-Pierre Gattuso.

Spanish: Juancho Movilla, Elisa Fernandez-Guallart, Carles Pelegrero and Marta Estrada.

我们向所有用英文以外的语言传播本指南的人们表示感谢。

请引用本文为：Ocean Acidification Reference User Group (2010). Ocean Acidification: Questions answered. Laffoley, D. d'A., and Baxter, J.M. (eds). European Project on Ocean Acidification (EPOCA). 24pp.

本指南由苏格兰自然文化遗产、自然英国、国际自然保护联盟、欧洲海洋酸化研究计划、英国海洋酸化研究计划提供资助，并借鉴了英国海洋气候变化影响研究联盟的宝贵经验与方法。

FSC