



# 碳捕获 与存储

## 是降低污染还是加剧污染？

**S**leipner West气田钻井平台耸立在高达650英尺（198米）的海面，喷射出雄雄烈焰，人们很容易把它误会成是一个环境噩梦。它上端的八层甲板驻扎了200名工人、支撑着重达4万吨的钻井设备。Sleipner West气田位于钻井平台挪威海岸，是欧洲最大的天然气生产商之一，它每年通过天然气管道向陆上的运输枢纽输送超过120亿立方英尺

（3.4亿立方米）的燃气。从这里开采出的天然气中大约9%是二氧化碳——全球变暖的主要“罪魁祸首”。但是实际上，Sleipner West不仅不是一个噩梦，而是环境创新的领头羊。自1996年起，该钻井平台操作者们就现场从天然气中分离二氧化碳，并把它埋藏于海床3000英尺（914米）之下，估计二氧化碳能在那里能保存至少1万年。

Getty Images

我们相信[碳捕获与存储, CCS]是一种减少全球变暖污染的切实可行的方法……我们已经具备了向这一方向迈进的知识。

—David Hawkins  
自然资源保护委员会

Sleipner West是由挪威最大的公司 StatoilHydro所经营, 当今世界上仅有几个大型开采公司捕获和埋藏二氧化碳, StatoilHydro是其中的一个。许多专家认为碳捕获与存储(也称为碳捕获与封存, 两者的缩写均为CCS)这一措施, 对于防止工业二氧化碳排放到大气中十分重要。公司代表说, Sleipner每年向Utsira地下水层(一个咸水含水层, 其容量足够储存欧洲所有的能源工厂600年的二氧化碳排放量)注入1百万吨的二氧化碳。

随着掌握越来越多的气候改变证据以及对化石燃料大约可以提供全球80%的能源需要的预测, CCS就象Sleipner喷射出的火焰一样耀眼。来自麻省理工学院的一个专家组最近总结认为CCS是“能够实现二氧化碳排放显著减少, 同时使化石燃料能够满足增长的能源需要的重要技术”。该专家组是在2007年3月14日MIT发布的一个报告——《煤炭的未来》(The Future of Coal)中提出这一观点。

对于上述观点, 环境保护团体有些分歧。自然资源保护委员会(Natural Resources Defense Council, NRDC)气候中心的主任David Hawkins在为NRDC发言时说:“我们相信[CCS]是一种减少全球变暖污染的切实可行的方法……我们已经具备了向这一方向迈进的知识。”其他环境保护团体, 包括世界资源研究所、美国环保协会和美国皮尤全球气候变化中心已经站出来表示支持CCS。这些团体认为CCS是许多可选择的减少二氧化碳排放方法(包括可再生能源)中的一种。

对CCS批评声音最高的可能是绿色和平组织。绿色和平组织北欧气候运动推行者Truls Gulowsen强调CCS转移了人们对可再生能源和效率改进的注意力; 他说, 那才是解决全球变

暖问题的最好途径。他说:“许多公司对CCS的谈论很多, 但是对其投入到实际应用中却做得很少。因此, 他们谈论的是可能的解决方案, 但是却没有真正去实施。与此同时, 他们推动的是开采更多的煤炭、石油和天然气而不是可再生能源, 我们已经知道可再生能源能对气候带来好处。”

#### 煤炭的使用推动了CCS的应用

世界范围内煤炭使用的飙升促使推行CCS加速。中国正在以每周2座的速度建设火力发电厂, 在2007年6月已经超过美国成为世界上最大的温室气体制造者, 这比预期的要提前好几年。MIT的报告中叙述, 在印度和其他一些发展中国家, 煤炭的使用也在增加; 而美国拥有世界上最多的煤炭储备, 其供给足够满足国内300年的能源需要。根据国际能源署的资料, 煤炭已经供给了美国50%的电力需求, 到2025年, 这一供给将达到70%。与此同时, 火力发电厂已经造成了世界上近40%的二氧化碳排放, 这一数字似乎还要急剧上升, 哪怕有再先进的可再生能源技术也回天乏术。在2007年9月6日美国众议院能源独立和全球变暖特别委员会的听证会上, 主席Edward Markey(马萨诸塞州民主党议员)指出, 仅仅在美国就有超过150个新的火力发电厂待建, 到2030年全世界将还要另建大约3000个。

一个完整的CCS系统能捕获和转运二氧化碳, 并把它们注入到至少深达1公里的地下。在那里, 高孔隙岩石层象海绵一样吸收二氧化碳。在这一深度, 高压和高温把气体压缩成浓稠的、类似液体的“超临界”态, 它取代盐水充满岩石粒间的小孔。封存比较适合以下三种地质结构: 位于淡水沉淀之下的咸水(因此不适宜饮用)含水层; 能够被经济地开采的很深或很薄的煤层以

及石油或天然气田, 在现场从燃料中分离二氧化碳然后被注回到地下, 迫使它们在地表的储备逐渐减少, 这一过程被称为“提高采收率”。使用二氧化碳来提高采收率已经有很长的历史, 尤其是在德克萨斯州的西南部, 那里的油田几十年来一直在减少。

在这三种地质结构中, 咸水含水层因其有更大的储存能力的广泛分布而被认为最有吸引力。美国能源部国家能源技术实验室(National Energy Technology Laboratory, NETL)应用科学和能源技术部的主任Thomas Sarkus推测美国中部的咸水含水层大概能储存美国国内2000年的二氧化碳排放量。

如今, 除Sleipner外, 只有两个企业的CCS项目在运作。阿尔及利亚一个涉及三家能源公司——StatoilHydro、英国石油公司(BP)和阿尔及利亚国家石油公司(Sonatrach)——的合资项目, 每年在靠近因萨拉赫——一个沙漠里的绿洲小镇——的一个天然气平台下储存超过1百万吨的二氧化碳。在加拿大的Weyburn, 一个加拿大能源公司EnCana为了提高一个正在老化的油田采收率, 也储存了数量可与之相比的二氧化碳。在Weyburn封存的二氧化碳是通过管道从200多英里之外的北达科他Beulah的一个煤炭气化厂输送来的。与其他提高采收率项目不同的是, 在那些项目中二氧化碳的最终命运并不是主要关心的问题, Weyburn把化石燃料采收与大规模二氧化碳封存的研究结合在一起。

MIT能源和环境实验室的访问学者Jim Katzer说, 我们现在需要的是大规模示范CCS的多种地质环境, 并探讨在地点选择、颁布执照、责任以及其他问题的政策。Katzer说, 有几个调查小组正在对5000至20000吨能力范围的储

存进行探测，我们已经获得了一些有用的信息。但是，他说，还没有找到一个我们真正需要的答案：应如何长期管理数百万吨的二氧化碳储存？

### 储存的代价

管理碳储存这项工作是一件让人头痛的事：仅在美国，火力发电厂每年会产生超过15亿吨的二氧化碳。封存数量如此之大的气体所需的不仅仅是大量的新建管道基础设施和储存场所，还有全国的火力发电厂采用的昂贵的碳捕获技术。事实上，现有的大多数美国工厂、世界上5000个火力发电厂中的大多数，包括中国正在兴建的一些燃烧煤粉（pulverized coal, PC）的工厂，使用的技术自工业革命以来就没有什么根本改变。在使用煤粉的发电厂，只有在燃料燃烧之后才能提取出二氧化碳，这种做法的效率低下，因为燃烧后的排放被空气大大稀释了。

更有效率的做法是在煤炭燃烧之前从中捕获高浓度聚集的二氧化碳气流。预燃捕获通常用于整体煤气化联合循环（IGCC）火力发电厂，这种工厂的数量极少，根据Sarkus的数据，全世界只有5家。IGCC发电厂的运营成本比一般的工厂要高20%，因为煤气化过程需要额外的能量，这是它们的数量如此少的原因。

虽然并不能排除厂家有为碳捕获而改进传统的PC发电厂的可能性，但是在撰写本文时采访的所有工厂没有一家对这一前景表示欢迎。这些工厂说，这种改进需要进行大规模的工厂改建，有可能使消费者在电费上的支付加倍。但是如果不考虑采用现有的一些技术设备，发电业将会把CCS的推广推迟数十年。目前大部分PC发电厂的设计寿命是30至40年。

不管采取哪一种方法，向CCS过渡需要花费大量的资金。在提高二氧化碳采收率的时候，它



在世界上，目前有三个企业规模的CCS项目正在运作：北达科他Beulah的大平原合成燃料工厂(顶图)把它的二氧化碳输送到200多英里之外，用于提高采收率；挪威的西Sleipner气田钻井平台（上图）把它的排放深埋到海底之下；阿尔及利亚的因萨拉赫项目（无图）把它的二氧化碳封存到地下。

Top: ©Black River Productions Ltd. Mitch Epstein. Courtesy of Siskema Jenkins & Co., New York. Used with permission. All rights reserved. Bottom: StatoilHydro

## 还没有找到一个我们真正需要的答案：应如何长期管理数百万吨的二氧化碳储存？

—Jim Katzer  
麻省理工学院

便是一种商品，需要支付它的埋藏。但是火力发电厂和其他工业只有一小部分是用于这一目的。要推广CCS基础设施，最终需要对碳排放进行收费。根据《煤炭的未来》一文中的估计，这种收费至少每吨30美元，即碳捕获和加压每吨25美元，运输和储存每吨5美元。随着物价上涨，这一数字每年还要上升。

斯坦福大学能源资源工程教授Sally Benson指出，支付这种收费有不同的方式。一种方法是对二氧化碳排放征税，她承认这种方案需要一些政策上的支持。资金也可以通过一种“总量管制与排放交易”系统来筹集，这一系统通过在开放的市场上对二氧化碳排放额度进行交易，来设定一个地区内的工厂可以达到的二氧化碳排放限。欧盟已经建立了二氧化碳总量管制与排放交易系统，该系统调控温室气体以达到《京都议定书》上所规定的义务。位于伦敦的一个贸易团体“碳捕获和储存协会”的首席执行官Jeff Chapman估计欧洲的总量管制与排放交易系统最终可以筹集到620亿欧元。

位于华盛顿特区的一个煤炭工业贸易团体，美国全国采矿业协会的对外交流副主席Luke Popovich说，在美国似乎不可能出现一个全国性的总量管制与排放交易系统，除非联邦政府把二氧化碳当成一种污染物来管制。与此同时，一些工业州，如加利福尼亚，通过清洁空气法案下的一条豁免制定了自己的空气质量标准，正在制定它们自己的总量管制与排放交易系统。加利福尼亚通过一个称为AB32的州法管制二氧化碳，该法指导企业在今后的13年中把所有温室气体的排放降低25%。Benson建议，CCS可能最终会逐渐在各州实施，这些州对碳排放的收费使CCS得以实现。

### 有待解决的技术问题

直到20世纪90年代早期，大多数从事CCS研究的工作者还是各自为战直到1992年3月，250多位研究者相聚在阿姆斯特丹的第一届二氧化碳脱除国际大会。麻省理工大学能源和环境实验室研究CCS的课题主任、知名专家Howard Herzog说，与会者到会时是以个人的身份，但离开时已是团体的一员。这一团体包括了资助机构、工业界和遍布全球的非政府组织。Katzer说，不幸的是，这一团体还没有足够的资源可以从实践的层面对CCS进行研究。实际上，《煤炭的未来》强调指出“确定碳封存的适宜性需要政府和私营企业去实施和大范围的综合展示，但这一方面仍没有到位。”

由于缺乏充分的证据，大多数专家只能假设封存的大量二氧化碳会保持在原地而不会泄漏到大气中。他们的这一假设是建立在现有的三个大型工业项目监测数据的基础上。根据《煤炭的未来》，这三个项目中没有一个显示出任何二氧化碳从地下储存点泄漏出来的证据。同时还基于另一设想，即埋藏的二氧化碳所表现出来的特性从本质上与地下化石燃料沉积物是一样的。世界资源研究所气候、能源和运送项目的高级助理Jeffrey Logan说：“我们对这一假设的可行性表示乐观。其理由是，既然石油和天然气资源能够保持数百万年的储存状态，为什么二氧化碳不能？”

斯坦福大学全球气候和能源项目的主任Franklin Orr说，监测数据显示，为了提高石油和天然气采收率而注入到地下的二氧化碳所处的地质结构与储存燃料达数百万年的地质结构相同；特别是在相互交叠的页岩沉积层，无论是化石燃料还是二氧化碳都不可能从那里逃逸。通过

石油和天然气工业界数十年的研究以及地质学的基础研究，已经揭示了封存二氧化碳所需的条件。他说：“你要寻找地下深处的、被低渗透性的页岩封盖的高孔隙岩石——例如砂岩。Sleipner和Weyburn都是很好的例子；它们两个都有很厚的页岩覆盖，这防止了二氧化碳逸出。”

但是Orr承认，大量的二氧化碳会在地下发生什么变化仍然是个疑问。他说，一个关键的避问题是避免二氧化碳从下层的断层或废弃的矿井中逸出，那些断层和废弃矿井有通向大气的通道。位于加利福尼亚州门洛帕克市的美国地质调查局(USGS)的水文学家Yousif Kharaka说，在美国有一些未知的但数量可能相当多的废弃矿井，它们是二氧化碳逸漏到大气层的隐患。他警告说，这将抵消封存对气候带来的好处。

作为对《煤炭的未来》结论的回应，Kharaka说，二氧化碳浓度的累积和对健康和生态学产生损害的可能性微乎其微。他说，只有当空气中的二氧化碳浓度达到或超过3%时才会对人类产生危害。这一浓度远远高于所估计的二氧化碳从地下缓慢泄漏能达到的浓度。德克萨斯大学奥斯汀分校的一个由州政府资助的研究机构—经济地质局的资深研究科学家Susan Hovorka警告说，尽管如此，从地下储存点泄漏出的二氧化碳可能会在地下室或其他封闭的场所累积，达到产生危害的浓度，这一可能性不能完全消除。她说：“我们正确地管理这一物质十分重要。如果你确定封闭一些场所可能会有风险，那么你就需要提供充分的空气流通。但是，我们对二氧化碳被保留在地下深处有充分的信心。”

Kharaka说，更需要关心的是移动的二氧化碳可能会与盐水混合，产生碳酸，它会溶解地下岩石中的金属，例如铁、锌或铅。他说，在一些

煤炭公司希望在总量管制与排放交易管制生效之前兴建新的工厂，他们很快就会这样做。他们的如意算盘是，到了碳封存在技术上和经济上都可行的时候，这些工厂和它们的温室气体排放可以免受新法的限制。对于他们来说，这是十分可怕的风险投资决策，而且从道德上也是不负责任的。

—Leslie Harroun  
橡树基金会

情况下，酸化的盐水会独自迁移，与地下淡水混合，通过饮用或灌溉产生健康危害。由Hovorka牵头、连同Kharaka和来自21个组织的其他科学家在德克萨斯休斯顿做了一项调查，得出的结果显示，注入到咸水含水层的二氧化碳使盐水的pH值显著下降，从6.5降到大约3.5。这些结果发表在2007年9月的报告《水-岩石交互作用：2007年7月31日~8月5日中国昆明第12届水-岩石交互作用国际研讨会记录》(Water-Rock Interaction: Proceedings of the 12th International Symposium on Water-Rock Interaction, Kunming, China, 31 July-5 August, 2007)中。Hovorka说，化学分析显示盐水里包含了高浓度的铁和锰，这表明不能排除有毒金属的污染。她补充道：“我们应‘持谨慎态度’。不能无视它的存在，但也无需把它弄得沸沸扬扬。”[更多关于对于CCS的风险的公开看法，请参见“Of Two Minds: Groups Square Off on Carbon Mitigation.”; EHP 115:A546 (2007)]

这个领域的专家一再指出，需要对二氧化碳在地下深处的活动以及它们的地球化学后果进行更详细的研究。Hovorka的研究是这类研究鼻祖之一，但是其1600吨的规模和现实条件下与气候改变所需减少的二氧化碳数量相比是微不足道的。

由于资金不足的限制，美国能源部把它的大部分CCS经费投入到“FutureGen”的项目。这一项目的发起是为了寻求建立一个火力发电厂的原型，它将综合CCS系统所有的三个特征，确切地说就是碳捕获(通过整体煤气化联合循环技术实现)、二氧化碳运输和封存。在能源部和工业联盟的支持下，这个为期4年、耗资15亿美元的项目已由布什总统在2002年的美国国情咨文上正式公布。一旦进入运行，这个发电厂将提供275兆瓦的电力(与传统的美国火力发电厂的600~1,300兆瓦相比)，足够275000个家庭使用。Sarkus也是“FutureGen”项目的主任，他说，4个发电厂和二氧化碳储存的厂址正在考虑中，2个

在伊利诺斯州、2个在德克萨斯州。他说最终厂址的选择将取决于社会的支持、充足的运输管线以及与地下储存点的接近程度。

布什政府的看法是，“FutureGen”将会在个煤炭和电力工业推动CCS的前进。但是许多利益相关者并不认为这一项目已经做得很好，能满足目前的需要。Hawkins一语双关地说：“这个项目中的‘未来’太多，‘眼前’太少”。对于这一点，Katzner补充道：“‘FutureGen’是2002年公布的，关于选址问题仍悬而未决，其中的一些关键设计问题也没有解决。最初设定是在2012年运行，现在可能要拖得更久。假设你能在2012年开始运行，运行4年，完成一个单独的示范项目就要等到2016年。这就把事情拖得太久，这就是为什么现在需要美国政府资助几个示范项目以使我们及时地处理二氧化碳排放。”

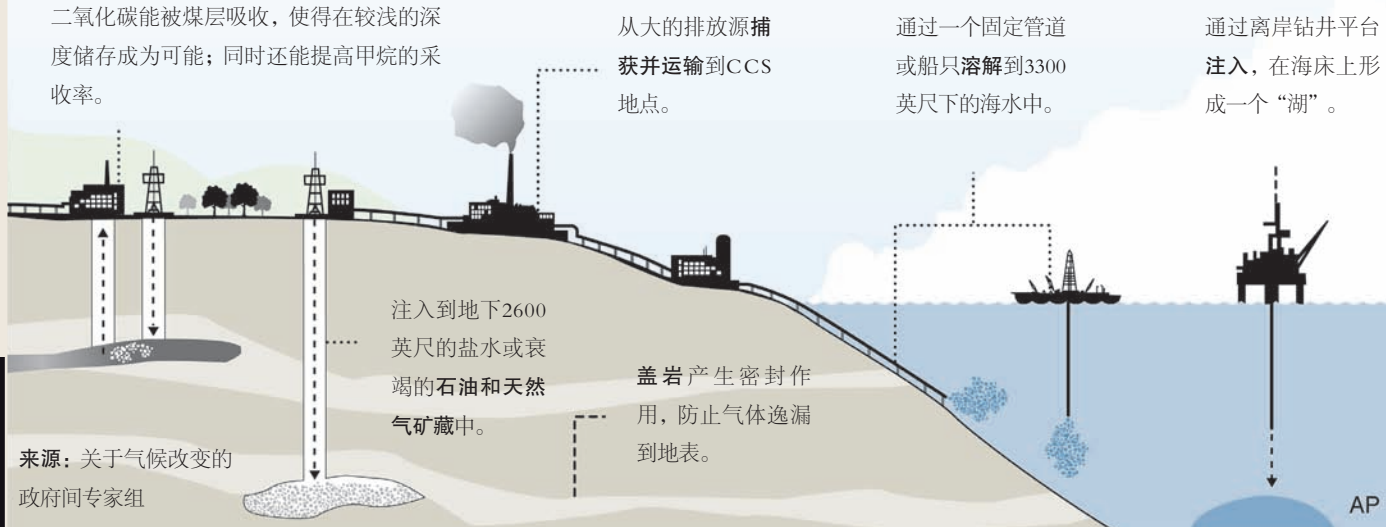
#### 发展中国家的因素

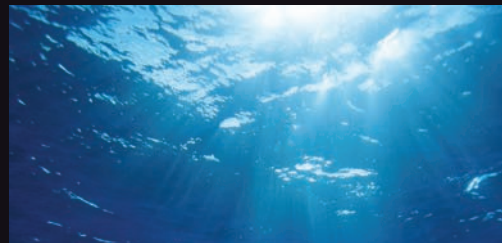
在美国的研究努力取得缓慢进展的时候，相比起来发展中国家的停滞不前引起越来越多

## 捕获碳

### 技术和理论

二氧化碳能被煤层吸收，使得在较浅的深度储存成为可能；同时还能提高甲烷的采收率。





的关注。中国国内电力有超过80%来自于煤炭。随着不断地推进经济增长，火力发电厂的低二氧化碳排放对于它来说不是优先考虑的问题。麻省理工大学原子能科学和工程学教授Richard Lester说：“中国似乎没有一家火力发电厂装备了碳捕获设施。以中国电力部门的规模和发展速度，那里引入CCS对于全世界缓解和减少大气中碳负担将是极为关键的。”

Katzer说，与此同时，从自身的经济增长来说，印度仅落后中国十年或更少，它使用煤炭作为燃料正在增长。他说，这两个国家的关键差别对于为环境和经济发展所做出的计划有影响。Katzer解释说，在中国，经济增长和环境战略似乎是在地方级别上制定的，没有任何的中央协调，这与其社会主义的政治体制相悖。而另一方面，印度似乎有Katzer所谓的针对经济增长的“全盘计划”。Katzer说：“但是他们对于如何向二氧化碳减排方向上迈进没有任何头绪。印度的官员对我所说的是‘如果费用不是很高，我们会管理二氧化碳。’而这正是CCS的不利方面。”

最终，CCS似乎被制定进了“第22条军规”：在发展中国家看来，美国和其他富裕国家应该率先考虑使用减排技术。与此同时，富裕国家的政府，尤其是美国，则期望工业界寻找解决问题的方案。但是美国的工业界说，他们负担不起大规模的研究；在工业看来，政府应该为一些额外的研究买单，那些研究是工业研究和未来技术应用的基础。然而，政府提供给能源部和其他机构的经费远远不够达成这一目标。同时，有两种机制可能会为CCS筹集到足够的税收—碳税和针对二氧化碳排放的总量管制与排放交易系统—则陷入了永久的政治僵局。

位于日内瓦的一个为社会和环境研究提供资助的组织—橡树基金的高级项目官员Leslie Harroun告戒说，工业界可能会把对CCS的承诺作为一个公共关系策略的杠杆，尽管现在做得很少，却能确保它将来要做的更广泛的布署。她断言：“煤炭工业提出了许多在全美国建设‘清洁’的、随时能捕获碳的火力发电厂的方案只不过是）烟幕弹。煤炭公司希望在总量管制与排放交易管制生效之前兴建新的工厂，他们很快就会这样做。他们的如意算盘是，到了碳封存在技术上和经济上都可行的时候，这些工厂和它们的温室气体排放可以免受新法的限制。对于他们来说，这是十分可怕的风险投资决策，而且从道德上也是不负责任的。但是也许他们认为自己人多力量大。”

在某种意义上，环绕在CCS周围的惰性可能反映了面对一种似乎不可抗拒的技术和社会挑战时所产生的一股畏缩。为了对气候改变做出贡献，一个CCS基础设施将用数百年的时间从全世界捕获和储存几十亿吨的二氧化碳。这些埋藏的沉积物将被未知的团体监测直到很远的将来。关于谁将“拥有”这些储藏以及随之而来的对这些长期储藏所肩负的责任，还存在很多问题。与此同时，工业界和政府正处在一种僵持状态，两者都不想担当将大规模CCS成为现实的领导角色。这一态势最终将如何对我们所处的星球的健康产生影响仍需拭目以待。

—Charles W. Schmidt

译自 EHP 115:A538-A545 (2007)

## 深海里究竟储藏了什么？

项看似无法实现的二氧化碳碳捕获与存储（CCS）的处理方法是深海储藏。科学家经过长期观测认为大量的CO<sub>2</sub>可能被储存在3公里以下的深海。巨大的压力可以压缩CO<sub>2</sub>使之密度大于海水，从而使它下沉。斯坦福大学的全球生态学教授Ken Caldeira提出，这些所谓的CO<sub>2</sub>湖可能悬浮在海底。

“一座燃煤发电厂每生产一千瓦小时的电就会产生约1kg的CO<sub>2</sub>。”他说，“一座十亿千瓦的燃煤厂，……如果产生的CO<sub>2</sub>都储存在海底，将形成一个10米深1公里面积的CO<sub>2</sub>湖——它将以这样的量逐年递增。”

然而，Caldeira及其他研究者承认深海储存不会是衡久的。除非这些气体会无缘无故地自然抑止，随着时间的流逝——也许需要500~1000年——一半以上的CO<sub>2</sub>可能通过海洋扩散，释放回大气中。此外，CO<sub>2</sub>湖中的大多数生命将会死亡。然而，Caldeira相信这种后果可能被限制温室气体排入大气带来的益处所平衡，在全球变暖的情况下，温室气体发生酸化并危及海洋生物。

没有人确切知道在深海贮藏期间将会发生什么，因为从来没有验证过。在20世纪90年代后期，由于当地环境保护主义者的反对，由美国、挪威、加拿大、澳大利亚研究者参与的一项在夏威夷海面上的实验被迫取消。根据Caldeira说，他先前协同指导过美国能源部原海洋碳隔绝研究中心，支持夏威夷研究的政府项目管理者已被调离，并发出一个信号——支持这项研究将会付出很大的政治代价。他说：“如今，没有钱投入这方面研究，海底储藏CO<sub>2</sub>的研究已处于停滞状态。”

—Charles W. Schmidt

译自 EHP 115:A545 (2007)