化油剂能缓解墨西哥湾的石油泄漏吗?

2010年5月5日，一架Basler BT–67型固定翼飞机向路易斯安那州霍马的海岸喷洒化油剂（上图）。海面的石油（右图，2010年6月7日拍摄于佛罗里达州彭萨科拉的海岸）将——由于风浪的作用以及其它因素——在一定程度上被自然分散。添加化学化油剂将强化这一过程，使大部分的表面油污转化为微小的油滴，转移到水柱中。截至发稿时，已有近二百万加仑的化油剂用于墨西哥湾。42%左右的化油剂用于这些化学品从未被检测到的海底深处。

Left: Stephen Lehmann/U.S. Coast Guard. Below: © Brandon Kruse/The Palm Beach Post/ZUMApress.com

在本文交付发表时，美国历史上最严重的石油泄漏事件的事态仍在蔓延。2010年4月20日，英国石油公司（BP）营运的石油钻井平台“深水地平线”号发生爆炸并倒塌，水下油喷已持续了85天，每天估计有147~252万加仑[1]——可能比这更多——的原油涌入墨西哥湾。事故原因是距离路易斯安那海岸42英里、水下5000英尺处的API 60-817-44169号油井发生点火气体泄漏，11名工作人员死于爆炸。截至发稿时，超过600英里的海岸线遭到污染，大约三分之一的海湾渔场被关闭[2]。7月15日，英国石油公司工程师用机械控油罩阻止了石油的流出，但此后石油和甲烷渗出在井口附近出现，油井以及海底的受破坏程度备受关注[2]。无人知晓之后会发生什么。

“深水地平线”号的石油泄漏带来了一片令人心碎的场景：垂死的鸟类、被石油污染的沼泽、关闭的岛屿以及深受其害的沿岸居民。但是，最关键的一幕却根本不为人见：神秘的分散油滴羽流在海底深处流动。这些羽流在某种程度上是由几英里深处的井口产生的强大物理压力引起，原油被打散成小油滴，永远无法升到海洋表面。泄漏应急处置人员使用了化学化油剂——溶剂、表面活性剂和其它专利添加剂组成的混合物——以达到相同的效果。化油剂从空中喷洒，直接撒入喷涌的井口，改变了石油的物理和化学属性，将它打散成直径约10微米的微小油滴（自然散开的小油滴约为10倍大）[3]。分散的油滴被扯（或“夹带”）入水柱，在此，它们通过海洋细菌的新陈代谢经历了一系列的清除过程。

使用化油剂——自1960年代中期就开始投入商用，处理石油泄漏——的决策总会牵涉到环境利益的取舍，德州农工大学（Texas A&M University）海洋化学教授Mahlon Kennicutt表示。未散开的石油漂浮在水面上，导致鸟类和海洋哺乳类动物窒息并污染了沿海资源，而那些分散的石油则通过水柱输送，更容易接触到海洋生物。“化油剂并不能让原油消失。”Kennicutt强调。

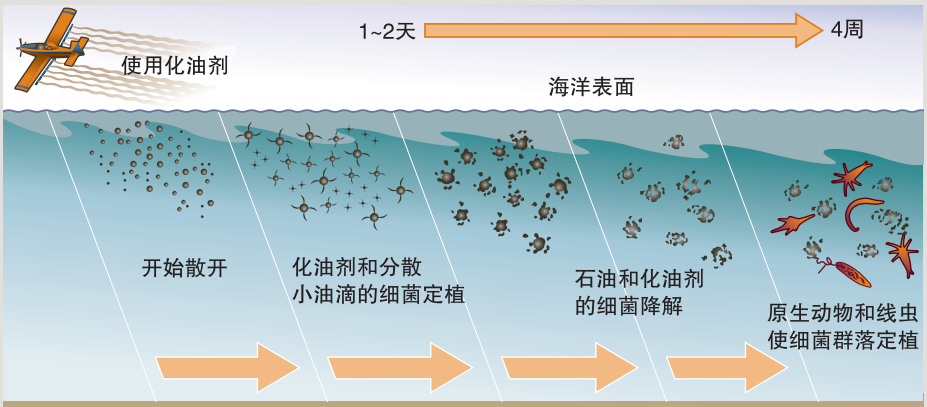
“浮游生物误食原油。”马里兰大学切萨皮克生物实验室（University of Maryland’s Chesapeake Biological Laboratory）副教授Carys Mitchelmore补充道。这很危险，因为浮游生物对海洋食物网来说至关重要。杀死它们，Mitchelmore说，后果将会不堪设想。

艰难的决策

在撰写本文时，已有近200万加仑的化油被剂慎重地投入使用，用以保护生态敏感的墨西哥湾海岸线[2]。尽管如此，鉴于科学家在化油剂对生态、特别是深海方面的影响知之甚少，仍有一些知名的环境保护论者质疑这一应用是否判断正确。环境保护协会（Environmental Defense Fund）的高级科学家Richard Denison在5月24日的一篇博客中写道：“围绕英国石油公司使用化油剂产生的未解问题、数据缺口以及隐瞒的[商业秘密]信息正如石油泄漏一般迅速涌出[4]。”

Denison和其他人质疑，如果维持原样、不打散石油是否不会更好呢。Mitchelmore解释道，当石油被限制在水下时，它更轻、更易挥发的化合物——即包含苯[5]、甲苯[6]、乙苯[7]和二甲苯[8]（BTEX）的芳香化合物——不能蒸发到空气中。取而代之，它们逗留在水中，从而对海底生物产生急性威胁，加州大学戴维斯分校（University of California，Davis）环境毒理学系系主任Ronald Tjeerdema表示。但是Tjeerdema指出，虽然BTEX化合物有急性毒性，但是它们并不持久——它们会迅速在海洋里分解，不会在鱼的组织中蓄积。

位于纽约州冷泉港的蓝色海洋研究所（Blue Ocean Institute，一个环境组织）所长、海洋生态学家Carl Safina则持不同见解：“化油剂只是让石油延伸到了更广袤的海洋环境。”



使用化油剂的决策具有很强的时效性——通常在泄漏发生的48小时内使用化油剂效率最高。
资料来源: Clark J. Dispersant Basics: Mechanism, Chemistry, and Physics of Dispersants in Oil Spill Response. Presentation to NRC Committee on Understanding Oil Spill Dispersants: Efficacy and Effects, 15 March 2004.

由国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration，NOAA）与美国环境保护局（U.S. Environmental Protection Agency，EPA）资助的一次会议，于5月26~27日在路易斯安那州州立大学（Louisiana State University）举行。会议期间，超过50名科学家得出结论，“深水地平线”号事件的应急处置中化油剂的应用是适当的[9]。拦油栅、除油设备、燃烧石油的方法，以及其它在海面上控制溢油的机械工具相对于在海中使用化学品来说肯定更为可取，新罕布什尔大学海岸应急研究中心（University of New Hampshire Coastal Response Research Center）联合主任Nancy Kinner承认，该中心组织了此次会议。但是，任何一次石油泄漏事件中海面很少能恢复超过10%，她说，机械恢复的方式只能在风平浪静的天气下奏效。

“即使没有飓风，每年这个时候海湾的风浪也很多，”Kinner说，“当石油进入海岸滩涂并影响滩涂的物种时，我们马上意识到必须把化油剂作为主要的应急工具。我们得出的结论是，大体上，比起任由石油浮在海面，进而迁徙到近岸栖息地，化油剂以及水柱中分散油滴的危害相对要小些。”科学家也建议应该不断重新评估化油剂的作用，Kinner强调，以确保它们合理性。

Mitchelmore表示当化油剂的危害大于益处时，官员们就难以明察秋毫了。“在这样的时间长度和海底的深度使用这个数量的化油剂是新的尝试，”她说，“我们心里没有底。”

在国家研究委员会（National Research Council）2005年发表的一篇报告中[3]，科学家们承认，海洋中用化学方式分散的油滴会产生什么问题还是一个谜。它附着于沉积物的比率尚且未知，因为这取决于它在海洋中散开的速度，海底生物如何摄入并处置它，以及微生物降解它时会产生哪些种类的副产品。

EPA新闻办公室女发言人表示，“如果对环境造成的任何负面影响超出益处，该局有权叫停化油剂的使用。”这些影响，她解释道，可通过两种方式测定：通过测量海湾水样中的溶解氧（dissolved oxygen，DO）以及测试小型海洋无脊椎动物轮虫暴露于海湾水体的死亡率。根据EPA的数据，海湾正常的DO浓度为4 mg/L [10]。但是，由于好氧微生物会代谢包括石油在内的有机化合物，它们从水中消耗并去除氧气，如果DO浓度下降太低将对海洋生物造成压力。

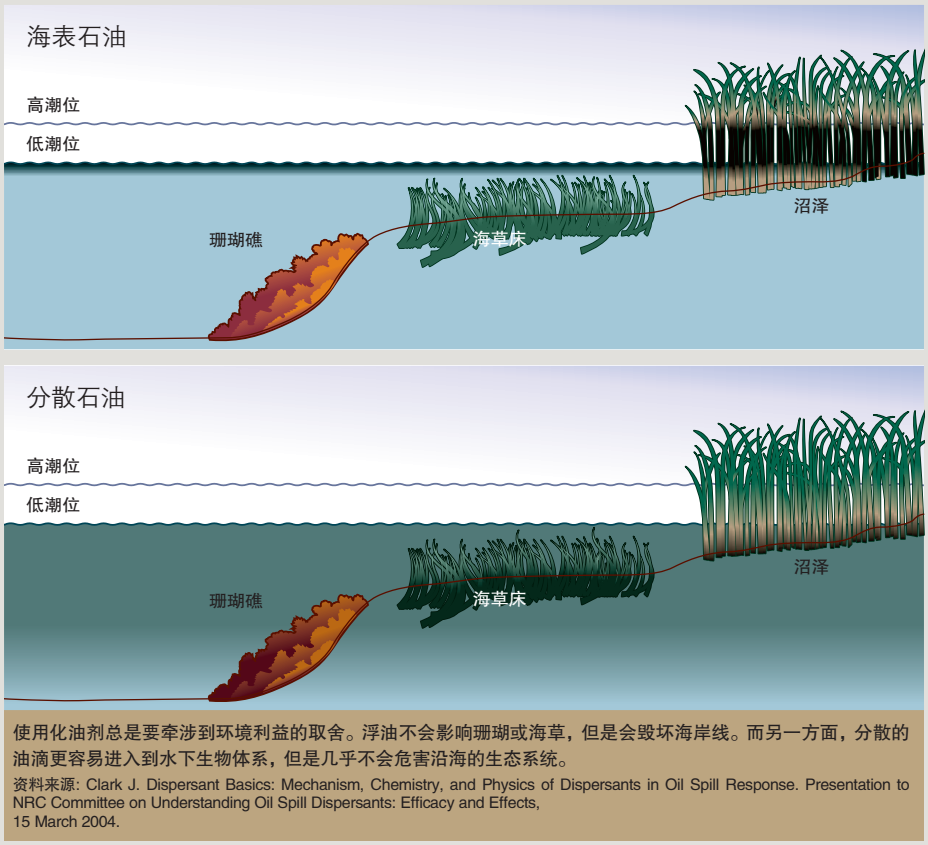
如果DO浓度下降至2 mg/L以下，EPA女发言人说，继续使用化油剂将会受到质疑。Mitchelmore警告，尽管如此，考虑到科学家们对海湾的深海生物形式知之甚少而且依赖于DO的特定值，这些临界值可能不是非常确定。“如果你对生活在此处的生物没有更多的认识，你就不能决定DO的影响。”Mitchelmore说。

Corexit大显身手

在“深水地平线”号爆炸前，“化油剂”一词还未家喻户晓。但是，今年当大量化学品突然用于墨西哥湾，公众开始要求了解更多信息。起初，记者们、甚至其他科学家们手头没有太多信息可公布。处理溢油的两种产品，Corexit® 9500和9527，由位于德州舒格兰的Nalco公司制造。物质安全数据表（MSDS）显示每种化油剂含有两种溶剂中的一种：Corexit 9527 [11]中发现的2-丁氧基乙醇（2-BE）——追溯至1970年代的老型号产品——或在新型号Corexit 9500 [12]中发现的石油馏分。Corexit化油剂也含有有机磺酸盐（一种表面活性剂）和丙二醇（一种稳定剂）。

由于MSDS还未公开其专利成分，这立即引发了怀疑虑——报纸警告说“秘密配方”被倾倒入海湾水域中。绿色科学政策研究所（Green Science Policy Institute）所位于加州伯克利，是减少有毒物质的智囊机构。该所的化学顾问Alex Madonik解释，Nalco公司没有法律义务向公众披露其化油剂的专利成分，并且EPA——知晓该成分——已同意保密。但是，由于公众对透明度呼吁的增长，六月中旬EPA在其网站上张贴了Corexit成分的完整清单[10]。那些未公开的成分是一些表面活性剂，包括山梨聚糖和1-(2-丁氧基-1-甲基乙氧基)-2-丙醇，后者按照Madonik的话来说是一种溶剂/防冻剂的混合物。Madonik对这些成分的任何潜在

Daniel Gallant/Foundry Zero



使用化油剂总是要牵涉到环境利益的取舍。浮油不会影响珊瑚或海草，但是会毁坏海岸线。而另一方面，分散的油滴更容易进入到水下生物体系，但是几乎不会危害沿海的生态系统。

资料来源: Clark J. Dispersant Basics: Mechanism, Chemistry, and Physics of Dispersants in Oil Spill Response. Presentation to NRC Committee on Understanding Oil Spill Dispersants: Efficacy and Effects, 15 March 2004.

毒性基本上是轻描淡写，但是承认“一些化合物公布的百分比范围很大，使得剂量和暴露有不确定性。”

Corexit 9527的MSDS主要引用了动物研究的结果，声称重复或过度暴露于2-BE可能会引起溶血（红血球损坏）或肾脏或肝脏损伤，而配方化油剂也可能产生皮肤或胃肠道刺激[11]。MSDS还表明，“已显示[暴露于2-BE的]人体红血球对溶血的敏感性远低于鼠类和兔类。这些影响是短暂的，当暴露中断，这些影响也随之消退。[11]” Corexit 9527的MSDS将该化合物对人类健康的危险划为“中度”，相比之下[11]，9500的MSDS则将人类健康危害列为“轻度”[12]。

除了2-BE被类似煤油的石油馏分代替，Corexit 9500与Corexit 9527完全相同。Tjeerdema表示，石油馏分的急性毒性较2-BE少，但由于它们属于碳氢化合物，更容易在海洋生物体中发生生物蓄积。然而，与石油泄漏事件中泄漏于墨西哥湾中的碳氢化合物相比，“Corexit 9500添加的那点是微不足道的。”他说。

英国石油公司已经囤积了几十万加仑的Corexit 9527用于“深水地平线”号事件的应急处置中，直到5月中旬断供，EPA透露[13]。从那以后，英国石油公司清污使用的唯一化油剂就是Corexit 9500 [13]。但是，在Corexit 9527停止使用后的几周，英国石油公司发表的数据显示，在近海采集的私人空气样本中仍有20%检出2-BE [14]——此发现至今尚未有任何解释。亨特学院（Hunter College）毒理学教授Frank Mirer评论，“如果2-BE不再使用的话，很难相信能发现这么大比例的样本有可检浓度的2-BE。这对化油剂使用信息报道的精确性提出了质疑。”

毒性：大问题

考虑到化油剂和原油的暴露是同时进行的，很难将化油剂对人体健康的作用单独分离。清污工人已经抱怨头痛、呼吸紧促、眩晕和恶心，由于化油剂在某种程度上使得石油更轻易地穿透皮肤，很有可能是化油剂的暴露加剧了这些作用，马萨诸塞州莱克星顿的环境卫生教授联盟Sciencecorps的毒理学家兼负责人Kathy Burns表示。然而，波涛起伏的大海、炎热以及在溢油现场的刺激气味也会导致这些症状。

与英国石油公司签有合同的环境咨询事务所生态系统管理公司（Ecosystem Management & Associates, Inc.）的副总裁兼高级科学家Don Aurand表示，现在使用的化油剂比以前的同类产品毒性要小。1967年，“Torrey Canyon”号超级油轮在英吉利海峡附近触礁沉没导致了世界上第一起大型石油泄漏事故，泄漏了2400～3500万加仑的石油，工作人员使用了化学去油剂、工业去污剂、煤油和其它产品来驱散油污[15]。这些产品并不是专门用于石油泄漏事故，因而严重破坏了生态环境，Aurand说。他表示，而新型的化油剂是特别为处置石油泄漏而设计，在最大效力驱散油污的同时将毒性降至最低。然而，这种平衡的取定难以评估，因为配方是商业机密，受到保护，不能向公众透露。

EPA的国家应急方案产品清单（National Contingency Plan Product Schedule）[16]显示，Corexit产品就其功效来说，几乎在所有核准的化油剂中敬陪末座。但是生态系统管理公司的总裁Gina Coelho声称，EPA的效能检测方式存在瑕疵。“工业界、学术界和漏油应急处置机构几十年来的研究显示，Corexit产品是化油剂的正确之选；它们对风化和新鲜石油的功效更好，能在大跨度的气温条件下使用。”她说道。

只要毒性尚存，人们对化油剂影响的大量关注就不光围绕着化油剂本身，

Daniel Gallant/Foundry Zero

2010年5月5日，在路易斯安那州的霍玛，正从槽罐中抽取Corexit化油剂，准备飞机喷洒。

Stephen Lehmann/US Coast Guard

还包括它与原油的结合。在莫特海洋实验室（Mote Marine Laboratory）从事化油剂对海洋生物影响研究的高级科学家兼项目主任Dana Wetzel说，与石油的水溶性馏分相比（例如，BTEX成分），Corexit产品对包括糠虾、美洲原银汉鱼、美国红鱼在内的海洋测试生物体的危害要低三个数量级。Wetzel的发现以她在实验室得出的急性LC_{50}值（反映杀死50%测试生物体所需的“致死浓度”）为依据[17]。然而，分散油滴的LC_{50}值与石油水溶性馏分的LC_{50}值相似，Wetzel说。她补充道，她和在此领域的工作同事都未曾充分地探究过化油剂的亚致死量作用，“因此，我们不知道，涉及到生殖或免疫功能的变化时生物体的化油剂积蓄量和体内分散油滴的积蓄量。”

Mitchelmore指出，同一化油剂或分散石油混合物对不同物种、甚至是同种生物的不同生命阶段，其LC_{50}值的差别也很大：“你可以在科学文献看到，在不同的物种和生命阶段中，Corexit毒性会有数量级的差别。”例如，她说道，EPA的国家应急方案产品清单中列出的13种经核准的化油剂中[18]，Corexit 9500与2号燃油混合的被列为对鱼类的毒性最强，但是对虾类的毒性则排第六。

与此同时，本文访谈的毒理学家们无一例外地表示LC_{50}值和生态的关联性存在疑问。“这些值并不能模拟实时的暴露，”Coelho说，“LC_{50}值测试一般持续24至48小时，持续的浓度比我们在环境中实际所见的要高出许多。”加州垂钓及娱乐部泄漏事件预防和处置办公室（California Department of Fish and Game's Office of Spill Prevention and Response）高级环境科学家Yvonne Addassi表示，“加标/衰退”的暴露试验能获得更好的结果，在试验期间，峰值浓度会模拟潮汐的周期随着时间的推移下降。

尽管如此，EPA主要依靠LC_{50}数据对化油剂进行比较，5月20日，该局指示英国石油公司选择一种不同的化油剂，其LC_{50}值大于（显示毒性较小）或等于月银汉鱼的23 ppm及糠虾的18 ppm [19]（虽然Mitchelmore指出，该局的指示误说为“小于或等于”）。这些值——在国家应急方案产品清单中有所反映[18]，现在正对清单进行修改——与Alabaster公司生产的一种化油剂Sea Brat #4相符合。然而，EPA的指示立即遭到了英国石油公司的拒绝，他们认为Sea Brat #4会代谢为一种内分泌干扰剂壬基苯酚，可在环境中滞留多年[20]。而Corexit的两种产品都不会降解为壬基苯酚，英国石油公司的官员反驳道，28天内两者都可在海洋中完全生物降解。

在要求核实LC_{50}数据准确性的压力下，EPA重新测评了八种已核准的化油剂，并发现Corexit 9500对水生无脊椎动物玻璃虾（*Americamysis bahia*）只有“轻微毒性”，对美洲原银汉鱼（*M. beryllina*）“几乎无毒性”[21]。在分别发表的测评结果中，Richard S. Judson和同事们报告，测试的化油剂无一有显著的内分泌干扰活性[22]。（Corexit 9527未经测试。）EPA现在正在检验路易斯安那州无硫原油的单个急性毒性以及与化油剂结合的急性毒性。

实时试验

自从泄漏发生后，多艘科研船一直在海湾采集样本。南佛罗里达州大学（University of South Florida）副研究员David L. Jones登上了该校的科研船（R/V）“Weatherbird II”号，报告了三个站点在5月22~28日间收集的样本结果，其中两个站点分别在井口东北40海里及东南45海里处，另一站点在井口西南142海里处。对“Weatherbird II”数据进行的NOAA分析显示，碳氢化合物浓度在小于0.5 ppm的范围内，而聚芳烃（PAH）的浓度值则以兆计[23]。此外，英国石油公司租用的“Brooks McCall”号科研船上科学家们收集的轮虫毒性测试结果，则检测到所有样本的生物体死亡率都为20%以上，据负责协调“Brooks McCall”号科研活动的Coelho介绍。

但是加州大学圣塔芭芭拉分校（University of California, Santa Barbara）微生物地质化学教授David Valentine说，他在“Cape Hatteras”号科研船上时收集的6月11~20日的样本可能会引起关注。Valentine观测到，在2500英尺或更深的水下，油滴羽流中的氧气下降了5~35%。这些羽流在溢油点5~7英里半径的范围内，碳氢化合物的水平高出正常水平的1万至10万倍。

“我们对海底羽流的规模毫无头绪，”Jones说道，“我们可能只追踪海底的表层油污，那只是冰山一角。”

5月25日至6月6日期间，乔治亚大学（University of Georgia）海洋生物学教授Samantha Joye在墨西哥湾内的“Pelican”号科研船及“Walton Smith”号科研船上工作。她在6月20日的一篇博客中声称，她的数据显示，西南方向的一片羽流自溢油点延伸了20多英里，而东北方向的一片羽流在30英里外仍可追踪到[24]。Joye表示，她将在其博客中公布“大致的”结果，而更精确的PAH测量值则有待在一份同行评审期刊上发表。“我不能[向媒体公开实际的数据图]，因为这样它们就不能被发表，”她说，“请放心，实际的数据图已实时提供给相关方——NOAA、EPA等——我们正全力以赴尽快让这些数据发表。”

在6月9日众议院能源和环境小组委员会（House Subcommittee on Energy and Environment）的听证会上，Joye强调，因为水下分散的油滴无法被清理干净，它可能对海洋的生态系统产生多年的影响[25]。它的命运几乎完全掌握在代谢细菌的手中，这些细菌可能促进深海低氧或缺氧的状况。“深水的[氧气]不能通过光合作用在原地补充，”她说，“相反，它能通过物理过程替换”——换句话说，海水每隔几十年进行“交换”（升到海面上）。如果墨西哥湾的深水变得缺氧，她推测，微生物可能转换为硫酸盐还原（替代依赖氧气的有氧代谢），提高对大量缺氧、含硫化物海水的清理潜力。

Joye说，这些影响将稳步向东扩展到西佛罗里达陆架——沿着海岸在水下约160～400英尺深处形成的由岩块和珊瑚礁组成的条状带。这一海洋保护区蕴藏着对墨西哥湾生态和经济最为重要的鱼类种群栖息地，如石斑鱼，Jones说道。“食物链底层的浮游生物可能会受到影响，一般而言，会发现幼小种群的毒性升高，”他说，“如果大量的石斑鱼聚集在受污染的地区产卵，成年石斑鱼可能会存活，而鱼苗却可能会死亡。”

但是Joye承认，科学家们从溢油点的得到的信息越深入，要搞清楚碳氢化合物污染与石油泄漏以及与每年自然渗进墨西哥湾的石油（估计为2400~6100万加仑）之间的关联就更困难[26]。墨西哥湾经常被人们描述为一张有“漏洞的”海床，在此一些生物群落已经适应环境，能代谢石油，并且约束它的影响，Joye说。“但是，虽然这些生物能够忍耐碳氢化合物及低水平的DO，英国石油公司井喷事件的影响将挑战它们的耐量……超出以往的任何一次。”她表示。

并非第一次

这次灾难中浮现的更不寻常的故事之一就是，泄露应急处理的技术并没有跟上深水钻探的发展。实际上，“深水地平线”号灾难事件的应急与30多年前在墨西哥湾发生的另一起大规模泄露事件的应急方式基本相同：拦油栅、除油设备、化油剂，失败的“封盖”行动，以及最后的新救援井。墨西哥国家石油公司（PEMEX）在卡门城西北方50英里处运营的一口水深约300英尺的石油钻台爆炸导致石油泄漏，在9个月后救援井钻成前，共泄露了超过1.46亿加仑的石油[27]。250多万加仑的化油剂（约75%为Corexit产品）用于泄露的处置，1981年合著了关于PEMEX原油泄露事件[27]研究文章的世界海事大学（World Maritime University）教授Olof Lindén透露。

“我很惊讶，除救援井外没有其它合理的解决方案——毕竟，三十年的时间过去了，运用替代技术从海床上收集泄露的石油应该已取得了一些新进展，”Lindén表示。相比周遭对本次泄露事件普遍持有的悲观情绪，Lindén抛出了一个比较乐观的评注，指出与阿拉斯加的威廉王子港不同——“Exxon Valdez”号油轮于1989年在此触礁——墨西哥湾较为温暖，亚热带气候会加速石油的降解。

“墨西哥湾的宽阔水域有着极大的稀释潜能，”Lindén说道，“我认为这不是墨西哥湾的终结，或密西西比州路易斯安纳以及亚拉巴马州沿海水域生产力的终结。如果你问我的话，这里的捕捞过度以及导致当地氧气耗竭的有机营养物排放[通过密西西比河向南携带]才是更为严重的问题。”

然而，全世界各地的研究仍显示，石油泄露对沿海产生的影响可以持续几十年。海中的石油能相当快地被好氧的微生物代谢，与之不同，被石油污染的海滩和沼泽主要依靠无氧降解，相形之下速度极为缓慢。在海滩沙子以下10～15厘米及泥浆沉积物以下2～3厘米，氧气水平就直线下降，现正从事这一课题研究的佛罗里达州立大学（Florida State University）生物海洋学教授Markus Heuttel指出。并且，一团团的石油可以从这些缺氧层持续滤出有毒物质长达几十年，他说。科学家们想要完全了解此次灾难带来的环境后果，可能就需要如此长久的时间。

Charles W. Schmidt，硕士，来自波兰的一位获奖科普作家，为《探索杂志》（*Discover Magazine*）、《科学》（*Science*）和《自然医学》（*Nature Medicine*）撰稿。

译自 *EHP* 118:A338−A344 (2010)

***本文参考文献请浏览英文原文**

原文链接

http://ehp03.niehs.nih.gov/article/info:doi/10.1289/ehp.118-a338