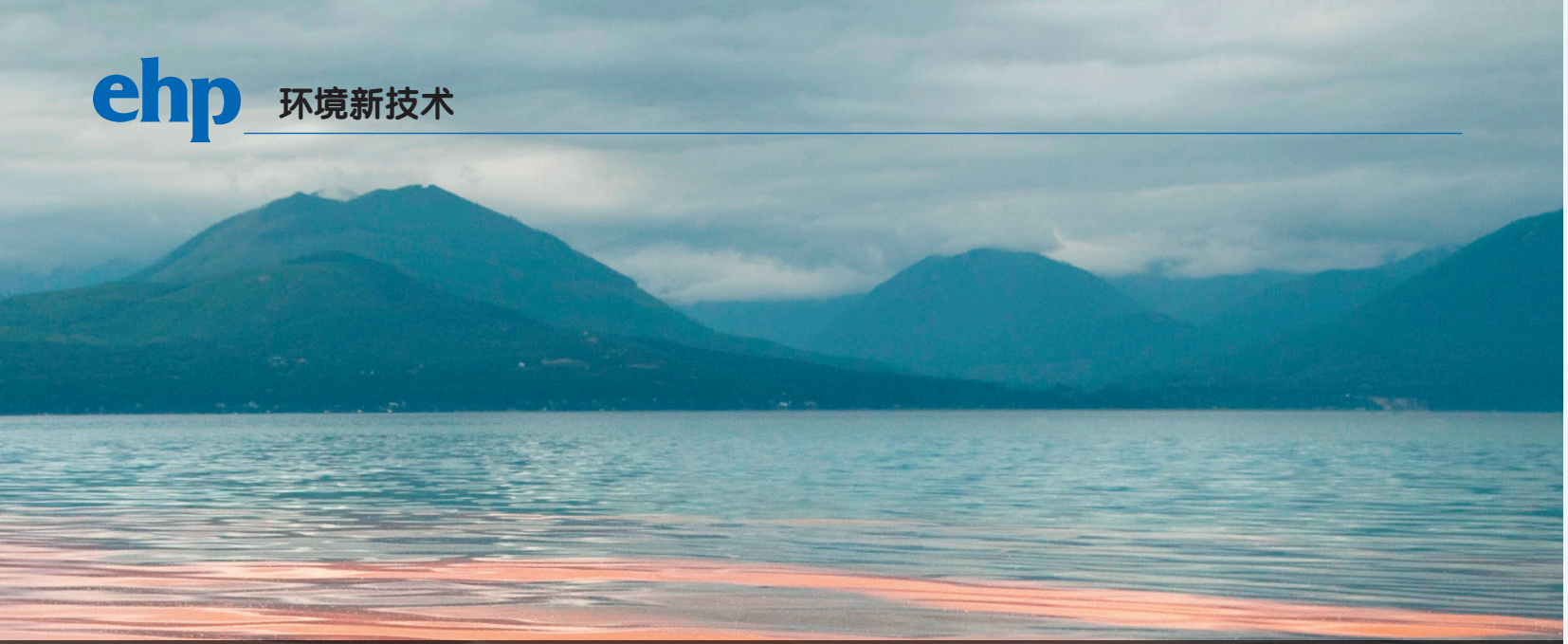


密切关注赤潮

探测、监测及预防有害藻华的新工具

华盛顿州普吉特湾，赤潮侵袭海岸。环境变化、人们意识的提高以及检测技术的改进使得赤潮报道次数逐年增加。© Purestock/Alamy

Thomas Hoover曾在美国海军担任核反应堆操作人员，为军舰安装雷达波吸收技术，也曾协助设计通讯卫星，在伊拉克维修排爆机器人。现在他的专长则是针对另一种敌人：有害藻华（赤潮）。

Hoover与同事正在蒙特雷湾水族研究所（Monterey Bay Aquarium Research Institute, MBARI）组建很可能是全世界最强且适应性最佳的赤潮检测装置，可以为研究人员提供一系列新功能。这项可以检测赤潮并测量其大小及毒性的新技术，是由蒙特雷湾水族研究所的工程师及科学家团队，以及来自华盛顿大学（西雅图市）、亚利桑那州立大学、缅因大学欧洛诺分校（University of Maine at Orono）、国家海洋和大气管理局（NOAA）位于南卡罗来纳州查尔斯顿市的海洋生物毒素计划的合作伙伴共同研制。

这只是推动该领域的许多新兴技术的其中一例，通过这些技术科学家可以更加准确高效地研究淡水及海水环境的赤潮生态。更佳的通讯能力、更高分辨率的卫星图像、更小更强大的传感器都促进了近年来的技术进步，因为赤潮正在全球范围内迅速扩散。

赤潮可以自然发生，但近年来富营养化的农业径流、赤潮藻类通过船舶压载水传播、沿海水产养殖场（为赤潮提供营养成分继而受赤潮威胁）以及气候变化似乎均促成了赤潮在世界范围内的扩散及恶化。公众意识的提高以及检测手段的进步使得近年来赤潮事件常见于报端。

赤潮可以多种形式出现，其危害性也有所不同。密集的无毒藻类可以消耗水中的氧气并对鱼鳃产生刺激；而有毒藻类可以突然间在淡水或咸水水体中疯长，对人类、鱼类（包括一些商业鱼类）、哺乳动物及鸟类构成威胁。

人类主要通过3种途径暴露于藻类毒素：饮用受污染的水，食用体内有毒素积累的鱼类或贝类，吸入雾化的毒素。健康危害包括胃肠道、神经、皮肤及呼吸道症状，取决于暴露途径以及毒素类型，有时候可以致命。

国家海洋和大气管理局与其他一些机构已经在一些地区准确地跟踪及预测赤潮，大幅降低了其对人体健康、渔业及经济的影响。但是削减成本的压力越来越大，这意味着必须寻找新途径实现目标。研究人员还希望通过利用可以自主收集高频赤潮及环境数据的新设备来改善预测，最大限度减少使用昂贵的调查船、人员采样及分析。能够预测赤潮来袭是“赤潮研究的圣杯，”加州大学圣克鲁斯分校（University of California at Santa Cruz）的浮游植物生态学家Raphael Kudela说道。

赤潮生态研究

在研发最先进的新型赤潮检测设备的同时，蒙特雷湾水族研究所的工作人员也在建造一个名为“魔怪”的远程自主水下航行器。这个形似导弹的机器人长10英尺（3米）直径1英尺（0.3米），其中28英寸（0.7米）长的部分用来安装检测设备——第三代环境样品处理器（Environmental Sample Processor, ESP）。最后组装时其零部件数量约为一辆汽车的2倍，可以在海水中行驶数千公里，并与岸上保持定期通讯，同时执行一系列科学试验，Hoover说道。

蒙特雷湾水族研究所总裁兼首席执行官Chris Scholin开发研制了环境样品处理器，因此在海洋学家中颇具知名度。该设备首次亮相是2001年在缅因湾用于检测亚历山大藻，该藻类产生的毒素可以导致“麻痹性贝类中毒”。

当前的第二代环境样品处理器常被称作“罐头中的实验室”；其大小相当于一个50加仑（189.3公升）的鼓。自2006年研发成功以来，该处理器已经被部署在不同地区开展了一系列赤潮相关的工作，包括在新西兰进行的水产养殖管理及水质研究项目、急需保护公众免受麻痹性贝类中毒的美国东北部、食用及娱乐用途的刀蛏收成受到伪硅藻及其毒素软骨藻酸——可以导致“记忆缺失性贝类中毒”——威胁的太平洋西北地区。目前全世界共有16个第二代环境样品处理器，其中6个由蒙特雷湾水族研究所制造，其余则由位于马萨诸塞州的麦克莱恩研究实验公司（McLane Research Laboratories, Inc）制造。

与最新一代设备一样，第二代环境样品处理器可以进行自主海水采样、检测水质、过滤水中颗粒物、利用DNA分析技术检测颗粒物中的微生物、评估海藻毒素及其浓度、测试或存储载有颗粒物的过滤器以供后续分析，与此同时可以接收操作人员的远程指令并返还其数据分析结果。然而由于体积限制其可移动性不佳，而且只能应用于系泊、码头固着及水面浮标。赤潮随海浪及洋流移动时处理器则无法跟踪，也不能进行三维探测。

因此第三代环境样品处理器代表了赤潮监控技术的一个飞跃，该处理器于2014年末进行测试，3～4年后就可以投放市场。第三代处理器具有与上一代类似的功能，但是更易操作，体积只有原来的1/10，Scholin表示更理想的是其价格更低。新设备可以对海洋中移动的赤潮进行跟踪监测。“至于有害藻类，我们认为这类似于‘先放狗侦察一番’，”Scholin说道。

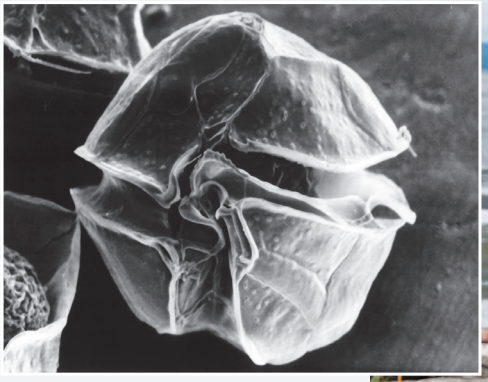
第三代环境样品处理器采集的数据不仅为研究人员提供更多有关赤潮生态的信息，以便更好地预测季节性藻华，还可以帮助他们在藻华接近海岸之前进行识别与跟踪。这意味着海滩与渔场可以及时关闭，而情况一旦好转又可以及时开放。

Scholin指出，新一代环境样品处理器可以装入背包或小型移动实验室，可以在野外多种环境下使用。他认为淡水域应用将是第二代与第三代处理器的下一个待开发领域，这需要适用于淡水藻类及其毒素的新测试及传感器，世界各地多个独立团队正在进行研发。新设备将具备更高水平的检测能力，以保护饮用水源以及在湖泊水库消遣娱乐的人们。

加利福尼亚州科普柯附近的克拉马斯河，蓝藻藻华环绕在渔船四周。渔夫对摄影师说，“看到这个[图片]的人都会说，‘船上那家伙太蠢了’，但他们应该自己来试试。藻类会掩盖鱼的行踪。”不论蓝藻藻华有利于或是不利于捕鱼，他们产生的毒素可以刺激眼睛、皮肤、肺及胃肠道，重度暴露甚至会导致神经损伤或死亡。© David McLain/Aurora Photos/Corbis

了解赤潮

大多数人以为赤潮就是“红色潮汐”，实际上藻华可以呈现多种颜色，而且并不是所有藻华都有毒。全国范围内沿海水域与淡水湖泊有9种不同类型的赤潮现象，大多在某些特定水域肆虐。所有50个州都受赤潮影响，包括美国几乎全部海岸线及淡水水体，从五大湖到小池塘都可能被殃及。赤潮可以造成巨额经济损失，美国沿海社区平均每年赤潮造成的损失达8200万美元，国家海洋和大气管理局强调这只是保守估计。其中收入损失、医疗费用及调查导致的人类健康影响估计占3700万美元。



评估人类健康影响的实际水平以及每年的病例数相当困难，因为疾病不一定都会上报或正确地归因于赤潮。无论如何，如果没有强大的州级渔业监测项目，赤潮造成的影响会大许多，这些监测项目负责确保捕获的鱼类和贝类可以安全食用。

科学家还不知道如何具体预测藻华，但总体来讲，藻类生长与水体营养水平相关。海水藻类通常与过量的氮相关，淡水藻类则与过量的磷有关。温暖的水体与产生毒素的蓝藻藻华相关联（也称为蓝绿藻，实际上它们是细菌），夏季时这些藻华在湖泊中最为繁茂。从长远来看，平均温度升高可能会使一些藻类扩大其水域范围。

然而对海岸管理人员及公共卫生官员来说，重要的是要知道藻华并不一定都有毒。国家海洋和大气管理局的海洋学家Greg Doucette指出，这是因为只有一小部分藻类可以产生毒素，而且这些藻类的毒素产量也各不相同。Doucette为第三代环境样品处理器开发了毒素传感器。“你不能想当然地认为这些细胞毒性很强、很弱或中等，”他说道，“毒素水平可以相差至少10倍，有时甚至更高，取决于毒素种类以及藻类的种类。”

Doucette认为这正是该项研究的令人兴奋之处。“我们要把这些仪器放置在水体中进行检测，看测量数据与贝类体内毒素或藻华毒素的相关性如何，”他说道。

实时检测

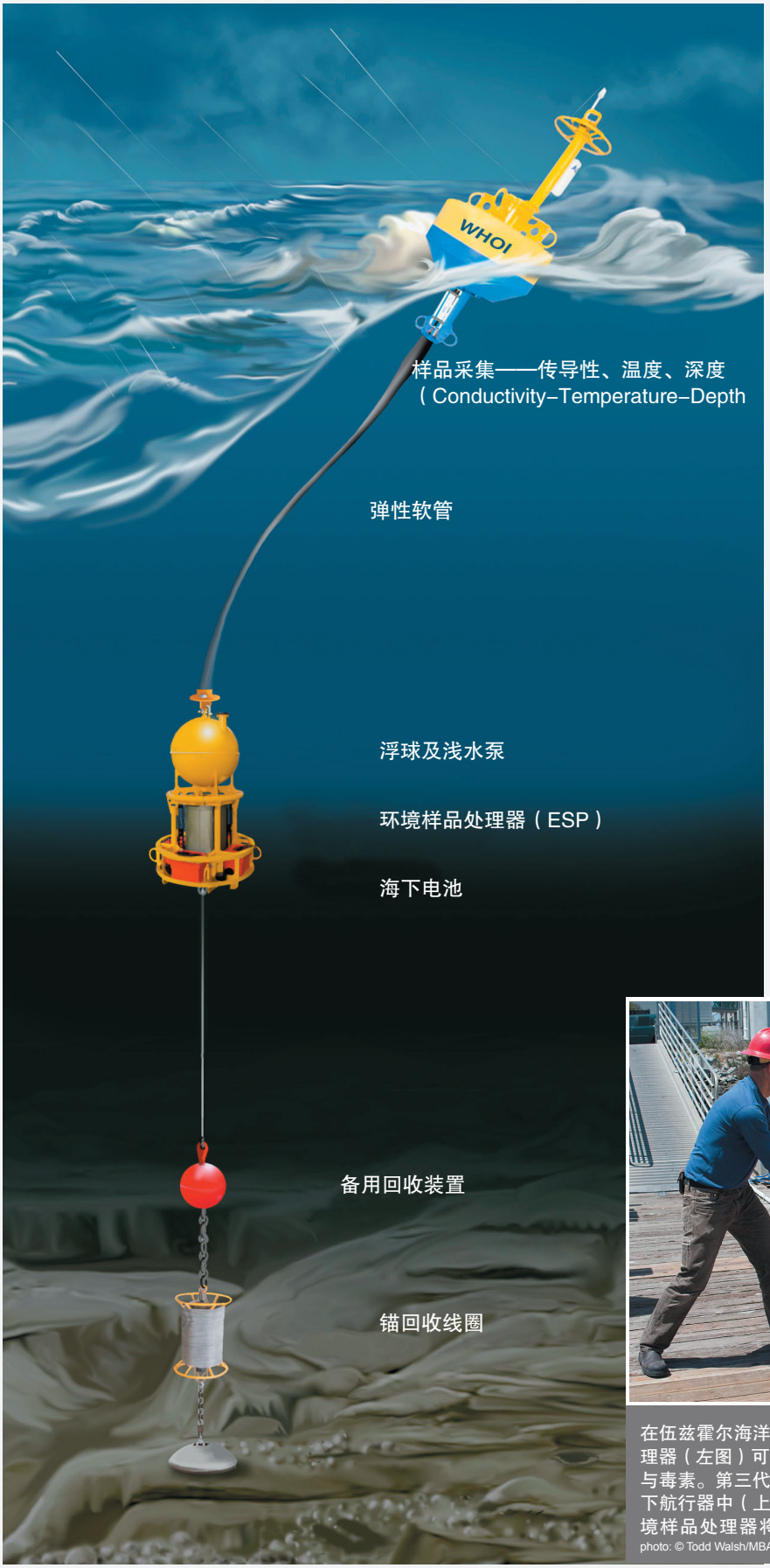
美国政府已经意识到开发这类工具的价值。为了给该研究提供经费，国会于1998年通过了《有害赤潮及缺氧研究与控制法案》（Harmful Algal Bloom and Hypoxia Research and Control Act），并于2004年对其进行了扩充。第二次再授权于2014年6月30日由奥巴马总统签署。

伍兹霍尔海洋研究所（Woods Hole Oceanographic Institution）赤潮项目主任、资深科学家Don Anderson指出，虽然有这些努力而且近年来取得了不少技术突破，但由于经济衰退以及国会政治氛围不佳，大多数项目的研究经费愈发紧张。“现在绝对是困难时期，”他说道，“大家的预算都有所削减。”

那些幸存的项目经费仍支持着该领域的加速创新。美国环境卫生科学研究院（NIEHS）的海洋与人类健康项目（Oceans and Human Health）经费负责人Fred Tyson表示，今年的资助机会公告（Funding Opportunity Announcement）收到了大量值得称道的项目。通过创造性地利用研究所及国家科学基金会（拨款计划的发起机构之一）的现有资金，可以资助13个项目，而不是预期的4～6个，大多数是在赤潮研究领域，其中5个直接涉及赤潮检测。

“实际检测赤潮与藻华预测对于环境健康科学研究所来说非常重要，因为我们可以据此采取预防策略，”Tyson说道，“如果人们有更好的检测方法，就可以更好地预测，更好

亚历山大藻（插图）产生的毒素可以积聚在滤食性贝类体内包括蛤、牡蛎和贻贝。人们食用污染的贝类后，这些毒素可以导致麻痹性贝类中毒。新的赤潮检测及监测措施旨在减少贝类养殖床不必要的关闭时间。Warning sign:© Steve Froebe/iStock;inset:©A.L. Loeblich III/WHOI

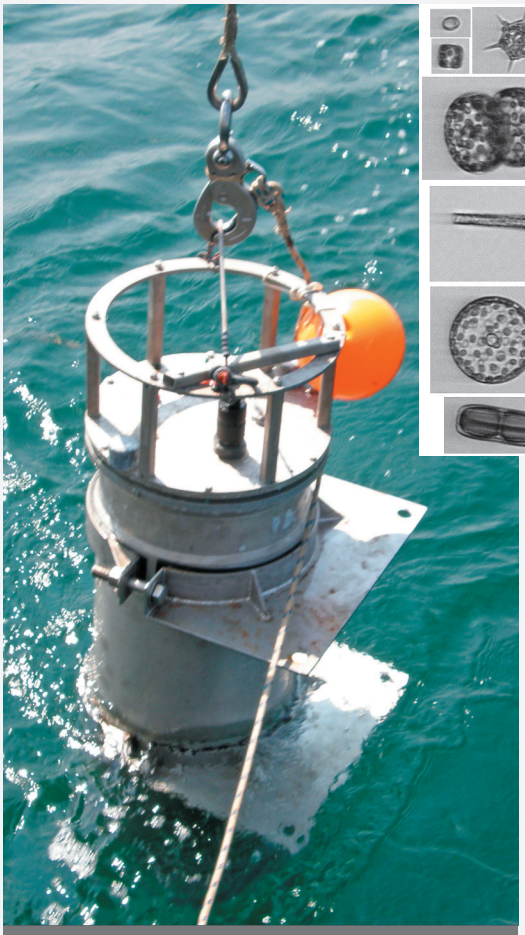


地向公众提供自我保护所需的信息。”

针对全国各地形式各异的赤潮威胁，今年资助的5个赤潮检测项目采用了一系列策略与工具。在缅因湾，伍兹霍尔海洋与人类健康中心（Woods Hole Center for Oceans and Human Health）的研究人员正在测试被称为流式细胞仪（Imaging Flow Cytobot）的一种颇具前景的新设备。这种水下自动显微镜可用于快速检测亚历山大细胞，其原理是用激光扫描藻类细胞，然后分析它们如何发出荧光或散射光线。该仪器由麦克莱恩研究实验公司制造，已经像环境样品处理器那样上市销售。该仪器还可以拍摄细胞与颗粒物的高像素照片，以供鉴定种类，所以能够现场自主鉴定及计数赤潮细胞。

虽然流式细胞仪无法检测藻华毒性，但它的优势包括快速数据处理、高频样品收集与分析（每小时3个样品）、多种藻类鉴别能力，而且可以每次在海上部署长达6个月时间。它还可以判断藻类细胞的不同生命阶段，有助于确定藻华何时会经历重要转化例如配子形成，融合生成的合子转变为休眠胞囊后沉入底部沉积物中，成为未来藻华的种子。

在伍兹霍尔海洋研究所开发的系泊配置中，第二代环境样品处理器（左图）可以自动收集并检测水样中表明赤潮存在的 DNA 与毒素。第三代环境样品处理器要小得多，安装在远程自主水下航行器中（上图），能够实地跟踪与监控藻华生长。新的环境样品处理器将于 3 ~ 4 年内投放市场。© E. Paul Oberlander/WHOI; photo: © Todd Walsh/MBARI



流式细胞仪利用自动水下显微镜拍摄水中悬浮颗粒的高分辨率显微照片。流式细胞仪（插图）生成的图像会被自动分类，其准确度可与训练有素的人眼相媲美。

Anderson认为流式细胞仪成像技术的最佳使用方法是与环境样品处理器配合使用，“它收集的数据非常不同，但很有互补性，”他说道。国家海洋和大气管理局项目协调员Quay Dortch表示，实际上实践证明该设备是一个有效的管理工具，且在某些情况下可能比其他设备更适用。该设备已经在德克萨斯州海岸线使用多年，提供赤潮预警。

今年海洋与人类健康资助项目的其中3个是针对五大湖地区的淡水赤潮。德克萨斯大学阿灵顿分校环境工程助理教授Hyeok Choi申请到一笔经费，用于伊利湖——或者说起码是从该湖着手——原位赤潮毒素检测系统。近年来伊利湖的蓝藻藻华问题愈发恶化，严重威胁到当地生态系统、渔业、财产价值、娱乐、旅游以及数百万人的饮水安全。

Choi的目标包括：研发一种能够检测到非常低浓度毒素的微型传感器、构建无线传感器局域网以便传感器与实验室进行通讯、将纳米技术传感器与相关部件集成到只有硬币大小、并在伊利湖上安装该系统进行2～3个月的测试。前3个步骤于2015年年初完成，Choi希望能在次年（2015年，编者注）夏天的藻华季节进行传感器水下测试。与那些顶级环境样品处理器相比，“我们的做法有点不同，”Choi说道，“我们不想开发昂贵的设备……我们能以很低的成本组装这种芯片状的传感器。”

新罕布什尔大学的Timothy Moore负责海洋与人类健康项目资助的一个研究团队，他们采用的方法则完全不同。他们的目标是开发一种算法，结合水质数据与遥感影像来预测有毒微囊藻的大量繁殖。该团队已经连续两个夏季在伊利湖部署浮标，持续测量水质参数包括温度、磷酸盐浓度、氧含量、藻类荧光及浊度。其目的是结合这些湖沼数据与藻华遥感图像以量化它们的相关性，最终提高卫星的检测及预测能力。“我们需要先开发、测试与完善水中数据采集的算法，然后才能将其应用到卫星数据。”Moore说道。

针对淡水赤潮检测的第3个项目是由威斯康星大学密尔沃基分校（University of Wisconsin-Milwaukee）的环境与职业健康助理教授Todd Miller负责。他的团队试图利用现有的水下传感器和自动采样装置，研究温纳贝戈湖（位于密歇根湖附近）的湖沼变量与湖中蓝藻产生的毒素之间的关系。他们打算利用这些数据建立一个模型，根据水质数据判断哪种毒素可能存在以及浓度多少。“饮用水处理厂的负责人可以根据该模型判断毒素是否进入了水处理系统，”Miller解释道。

与此同时，位于底特律的韦恩州立大学光学仪器中心的主任Judy Westrick正带领其团队研发赤潮分析技术，他们使用的方法是一种被广泛使用的定量PCR法（定量聚合酶链式反应）。定量PCR的工作原理是识别DNA片段，因此并不是检测毒素本身而是检测微生物体内负责生产毒素的基因。Westrick表示，定量PCR分析仪已经被许多公共机构用于海滩监测，也可以用来进行新的赤潮分析。“从人类健康的角度来看，可以进行早期预警，”她说道，“我们的目标是能够为管理人员提供这种技术。”

更好地预测

国家海洋和大气管理局是赤潮研究经费的另一主要来源。一直以来，其海洋与人类健康倡议项目在全国范围内为科学家提供资助，研究一系列包括赤潮在内的有关水质的课题，然而近几年来该项目的经费已经完全中断。

国家海洋和大气管理局还管理着3个专门针对赤潮的竞争性资助项目。第一个项目是有害赤潮生态学与海洋学项目（Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms），于1998年启动，研究赤潮形成的原因及其生态。

有害赤潮生态学与海洋学项目是由加州大学圣克鲁斯分校率领的一个合作团队负责，其中一项研究是关于两个区域性赤潮热点（加州中部的蒙特利湾与洛杉矶附近的圣佩德罗湾）在数年内海洋学过程与人类活动对赤潮产生何种影响。2014年4月该团队在南加州沿岸使用了两个环境样品处理器、自动航行器、船舶及数值模型监测赤潮活动及海洋状况。另外3个有害赤潮生态学与海洋学项目于2011年获得资助，但是自那以后还没有新的经费资助此类研究。

第二个资助项目是有害赤潮监控及事故应对项目（Monitoring and Event Response for Harmful Algal Blooms），于1989年启动，旨在将有害赤潮生态学与海洋学项目或其他以科研为基础的项目应用到实际的、管理为基础的现实情况中；该项目自2011年以来没有获得过新的经费。伍兹霍尔中心的Anderson是有害赤潮监控及事故应对项目的首席研究员，该项目旨在把环境样品处理器采集的数据与缅因湾现有的赤潮监控及管理系统相整合。

Anderson与同事希望展示环境样品处理器网络如何增强当前用于检测赤潮毒素的测试法，以及如何终止样品采集。环境样品处理器数据可以为有毒生物在某区域的分布情况提供更广阔的视角。Anderson解释道，例如海岸沿线的赤潮威胁目前是通过测定贝类体内毒素进行评估，使用的是生物测定或化学方法如高效液相色谱法；这些样品通常取自海岸沿线的贝类，因此没有关于沿岸水域或离岸水域可能存在的藻类本身的数据，而现在可以通过系泊在海上的环境样品处理器获取这些数据。如果将环境样品处理器数据与海洋环流计算机模型相结合，则可以极大改善短期预测，管理人员因此可以最大限度地延长贝类养殖床的安全开放时间以利收获，Anderson说道。

第三个资助项目是有害赤潮预防、控制与减灾项目（Prevention, Control, and Mitigation of Harmful Algal Blooms），是国家海洋和大气管理局的一个相对较新的项目，旨在为海岸沿线管理人员提供新的颇具前景的检测及控制技术。该项目还涉及评估赤潮的经济影响。

有害赤潮预防、控制与减灾项目目前为伍兹霍尔中心在缅因湾的亚历山大藻预测项目提供资金。该项目根据过去几年的气象与海洋条件，对即将到来的藻华季节之严重程度进行预测。2008至2013年间，该项目的预测有4次准确2次错误。他们预计2014年的藻华季节为中度暴发，迄今为止还算准确。负责赤潮生态学与海洋学项目以及赤潮预防、控制与减灾项目的Dortch指出，缅因湾预测系统最终会被纳入国家海洋和大气管理局的有害藻华预测操作系统，该系统已经为佛罗里达州与德克萨斯州离岸水域的腰鞭毛藻藻华进行了预测。

转折点

Dortch认为尽管在过去10年中经费持续削减，但赤潮监测与检测技术已经发展到了一个转折点。“如今这么多技术已经研制成功，我们已经可以投入使用了，其累累硕果真是令人惊讶，”她说道，“我认为我们很快就可以实现许多新功能，我们取得的这些成就应该归功于这些项目。”

国家海洋和大气管理局西北渔业科学中心的海洋生物毒素项目经理Vera Trainer认为，尽管对于科学家和海岸管理人员来说这些新兴技术颇具前景，但是那些沙滩爱好者和船舶爱好者依然可以起到重要的赤潮监测作用。基于民众的监测方案（越来越多地通过智能手机应用程序）也有助于密切关注赤潮，普通人经过培训后可以在海岸线选定地点进行样本采集、简单的显微镜观察及计数。

“在一些地区这是赤潮监控的重要部分，”Trainer说道。“结合民众监测、标准贝类监测以及新技术的综合措施将是最全面最有效的。”

除了理解和预测赤潮之外，我们还需要做的是：减少导致藻华的人为因素，以及在藻华泛滥伊始将它们消灭在摇篮之中。韩国和中国已经在试验在水体表面喷洒粘土，以使藻类细胞聚集并下沉。这两个国家的鱼类养殖业都非常繁荣，他们正在努力保护其免遭赤潮危害。伍兹霍尔海洋研究所的 Don Anderson 建议美国也尝试一下该法，“可以非常有效地清除水中的藻类细胞，”他说道。

一些研究人员甚至美国环保署已经考虑了该提议，国家海洋和大气管理局设置了赤潮预防、控制与减灾项目，为一些减灾项目提供资金。但是 Anderson 指出，由于环保法规的限制，很难在美国水域实施这种措施，而且对于沿海的大型藻华来说粘土法不切实际。他认为对于大型藻华，目标依然是准确预测以保护资源，并确保有毒鱼类及贝类不会在市场出售。

Nate Seltenrich，来自加利福尼亚州佩塔卢马市，撰写科学及环境方面的文章，其作品发表在《西部新闻》（*High Country News*），《山岳协会》（*Sierra*），《耶鲁环境360》（*Yale Environment 360*），《地球岛期刊》（*Earth Island Journal*）以及其他地区及国家级出版物。

译自*EHP* 122(8): A206–A213 (2014)
翻译：周 江

*本文参考文献请浏览英文原文
原文链接
http://dx.doi.org/10.1289/ehp.122-A206