

切尔诺贝利与海洋环境： 历史地看待放射学影响

IAEA 摩纳哥海洋环境实验室的科学家在切尔诺贝利事故
后研究中起着不可或缺的作用

Pavel
Povinec,
Scott
Fowler 和
Murdoch
Baxter

1986年4月的切尔诺贝利核事故，对陆地环境和海洋环境都造成了重大影响。释放的核碎片的总活度如此之高（达 $1-2 \times 10^{18}$ 贝可勒尔），以致事故后广泛散布的放射性落下灰实际上支配了世界许多地方人为环境放射性水平。

人为放射性核素的浓度一般因地区而异，这取决于各种污染源的位置和大小。海洋放射性的主要全球来源，与造成陆地环境影响的来源一样，仍然来自尤其是50年代和60年代期间的大气层核试验产生的放射性落下灰。

不过，在诸如爱尔兰海和北海等某些地区，海洋环境中的人为放射性核素（如铯-137和钚-239）浓度一直明显地受排放物（如欧洲后处理厂的排放物）的影响。另一方面，波罗的海和黑海一直是受切尔诺贝利事故影响最严重的海洋。在后者所在的所有地区，人为放射性核素浓度一直是在随空间和时间而变化。造成这一结果的是不断变化的源项和海洋过程，包括海水中的水平搬运和垂直搬运，海洋沉积作用，沉积物的重新悬浮和生物学摄取，以及食物链转移。

IAEA-MEL 示踪原子研究

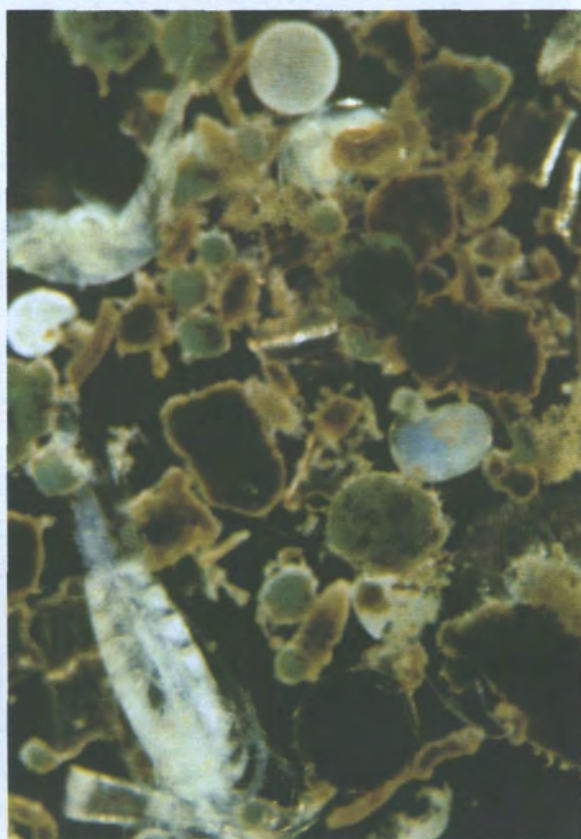
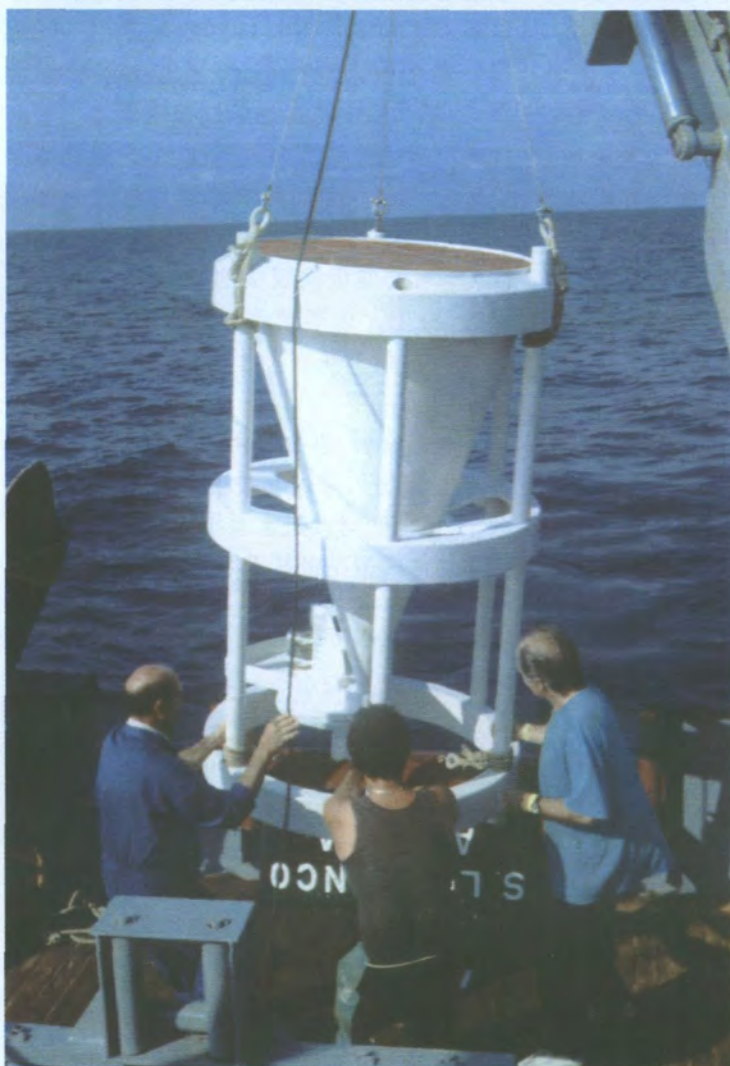
可能令人惊异的是，世界各地的海洋学

Baxter 先生是 IAEA 设在摩纳哥的海洋环境实验室主任；Fowler 先生是放射生态学科科长；Povinec 先生是辐射测量科科长。

家对切尔诺贝利事故产生了浓厚的兴趣。事故向大气释放的大量放射性实质上引起了世界各地以从未有的精心规划的规模开展暂态示踪原子实验。事故后不久，大火释放的裂变产物和活化产物进入欧洲各地的海洋水体。这些产物卷入了许多元素循环中。海洋学家数十年来一直在试图用各种常规技术表征这些元素循环。切尔诺贝利事故发生，人们便突然可以利用一套放射性示踪元素作为一个脉冲，颇象利用染料一样来示踪海洋中各种元素的运动。IAEA 摩纳哥海洋环境实验室 (IAEA-MEL) 的科学家通过开展海岸和外海生态系统的放射性核素监测工作，参加了这一令人兴奋的和侥幸得以进行的实验。

外海监测工作方面，15 年来海洋监测中最重要的创新之一，是开发了用来直接测量与沉降颗粒相关的物质通量的沉积物收集器。锚定的沉积物收集器可被固定在海洋中任何深度。它们不要人照看，便可按预先设定的时间间隔收集分隔的时间序列样品。

作为法国-IAEA 地中海外海颗粒通量联合研究工作的一部分，IAEA-MEL 的科学家在时间安排上幸运巧合地于 1986 年 4 月中旬，把其自动取样的时间序列沉积物收集器锚定在位于摩纳哥和科西嘉岛之间的利古里亚海中 200 米深处。为了研究颗粒通量的时段变化，安置 6 个收集器采集杯一个接一个地采集沉降颗粒样品，采样时间各为 6.25 天。4 月 26 日事故发生后，IAEA-MEL 在摩纳哥进行的大气测量表明，大部分切尔



上图：作为 1994 年 11 月伊斯坦布尔 IAEA-MEL 培训班的一部分，科学家们使用伊斯坦布尔大学的船在马尔马拉海采集沉积物样品。

左图：一个 IAEA-MEL 科学家小组在布设与他们在切尔诺贝利事故后海洋研究期间使用的一样的沉积物收集器。

右图：沉积物收集器中采集到的典型颗粒包括正在起劲地吃微生物的浮游动物排泄的卵型、矩型和圆柱型粪便颗粒。（来源：IAEA-MEL）。

诺贝利峰落下灰在5月4—5日期间基本上作为单脉冲进入利古里亚海。

5月22日取回沉积物收集器,用 γ 能谱测定法分析了颗粒物质以及其他海水样品的放射性。放射分析表明,颗粒放射性核素的初始脉冲在5月8—15日即峰放射性被释放到海面后仅仅大约7天,到达200米深处。时间上的滞后意味着放射性颗粒的平均沉降速度约为每天30米。这种通过200米下沉的放射性脉冲对粒子反应性裂变产物(如锆、铈和铈放射性核素)来说特别明显:这些裂变产物在5月15日以后采集的最后的沉积物收集器样品中要么探测不出来,要么其量非常低。

这些放射性核素在几天时间内就快速沉降的事实表明,它们并非象落下灰那样按斯托克斯沉降模式沉降。而是,它们结合成大的团粒后以每天数十或数百米的速度沉降。

根据IAEA-MEL较早期的实验室研究,人们曾推测在事故发生的当时,表层水体中的生物活性可能导致象海绵一样吸收放射性核素并把它们移到深处。微小的象植物一样的浮游植物群落细胞的初始生产,形成了可吸附放射性核素之类污染物的固态表面。随后,以这些放射性细胞为食的浮游动物排泄出的大团粒(粪便颗粒),在沉降时可进一步捕获放射性。

因此,为了验证这一假设,1986年5月6日从沉积物收集器上方的水体中捕捞出活的浮游动物,并使其在船上特制水族箱中排泄。分析时发现,浮游动物新排泄出的这些粪便颗粒所含放射性核素的浓度和相对分布情况与200米深处收集器采集到的沉降颗粒中的相似。显微镜下检查收集的样品,证实其中富含(占重量的70%)与捕捞的浮游动物的排泄物一样的粪便颗粒。因此,这种偶然的“现场实验”实际上是第一次直接地和令人信服地证明,存在一些可使海洋水体清除放射性核素之类污染物的生物学过程。

切尔诺贝利事故之后,进入周围海域中的不同放射性核素按其化学反应性,已得到

不同程度的清除。以粒子反应性放射性核素(铈-141,铈-144和铈-239—铈-240)为例,其沉降在地中海这一海域的放射性核素总存量在事故后一个月沉积物收集器不再取样以前,已有50%至75%通过了200米深处。与其成鲜明对比的是,相应的铈-137沉降量中仅有0.2%在这一时间通过200米深处。这一观察结果与这种长寿命核素在海水中的一般的非反应性行为一致。因此,源于切尔诺贝利事故的铈-137已证明作为事故后数年中地中海和其他海域中水体运动的示踪剂是非常有用的。

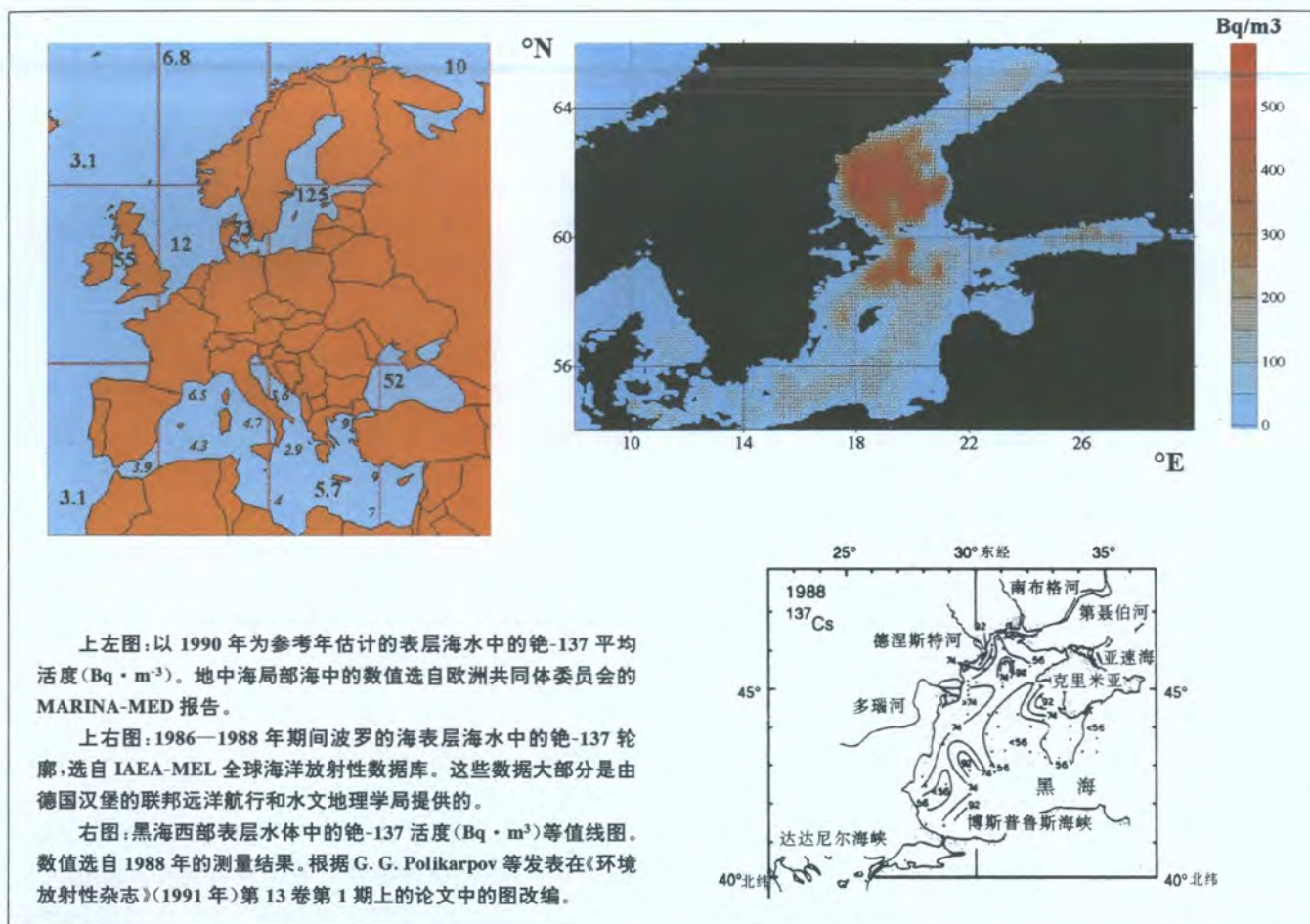
IAEA-MEL并不是切尔诺贝利事故后在欧洲水域推广应用沉积物收集器的唯一海洋科学家组织;几乎与此同时时间序列收集器也在北海、黑海和苏黎世湖采集颗粒。在能够做出比较的地方都可看到,源于切尔诺贝利事故的放射性核素的浓度在不同沉降颗粒中惊人地相似,并且在大多数场合下,上部水柱中的生物活性被认为是把放射性向下搬运的驱动力。不过,由于通常情况下因位点和深度而异的颗粒质量流密度的变化,显然在放射性核素通量上存在很大的区别。在苏黎世湖观察到了极端的情况,在那里,由于大规模繁殖的钙质海藻的沉降,约20%的落下灰在两个月内就从水柱中被清除掉了。

总起来看,事故发生后在整个欧洲收集到的关于切尔诺贝利放射性核素时间通量数据,已证明对改进水系统中污染物去除和搬运总体模型是极其重要的。

环境和放射学方面

切尔诺贝利事故期间大量释放的20多种放射性核素中,只有几种已在海洋环境中被广泛地研究过。其中最重要的放射性核素有铯-90、铯-134、铯-137和铈-239—铈-240。其他放射性核素,或者浓度极低(如碘-129)或者半衰期很短(如碘-131),不会有害或有助于了解海洋过程。

如前所述,这些放射性核素在海洋行为方面有明显差别。铯-90和铯-137是可溶于海水的元素的两个典型代表,因而可用于水



动力学研究。它们的粒子反应性,例如与钚同位素相比很低。钚同位素处于另一极端,属于溶解度低和粒子反应性高的一组元素。钚同位素不会远离其源,原因是它们被沉淀在沉积物中。所以,沉积物包含了钚同位素在海洋中的主要存量。

由于切尔诺贝利事故后向海洋的钚的输入量少且局部化,因而本文将主要讨论切尔诺贝利事故释放的放射性铯对海洋环境的影响。铯同位素是释放的同位素中分布最广和含量最丰富的同位素。

长期以来,人们一直依据核试验落下灰和核处理厂的排放物,研究放射性铯在海洋中的行为。特别是,联合王国塞拉菲尔德后处理厂的排放物一直被广泛地用于研究爱尔兰海、北海和挪威海海水和沉积动力学。核武器试验落下灰中的放射性铯无例外地是铯-137。而铯-134 既存在于塞拉菲尔德后处理厂的排放物中,也存在于切尔诺贝利事

故的碎片中。但是,铯-134 与铯-137 的比率一直不同。因而很容易把切尔诺贝利事故释放的铯与其他来源的铯区别开来,因其具有与众不同的约为 1:2 铯-134/铯-137 活度比率。

从放射学角度看,受切尔诺贝利事故影响最大的海洋是波罗的海,因为来自切尔诺贝利的第一股放射性烟云向北飘移,致使整个斯堪的纳维亚地区遭受到高的放射性沉降影响。大气沉降在决定波罗的海放射性方面起了主要作用。表层水体中铯-137 平均浓度以 1990 年为参考年估计,在波罗的海中是最高的(见本页地图。)由于波罗的海是封闭的而且与北海交换的水量少,海水中铯-137 的水平在欧洲一直是最高。

地图上所示 1986—1988 年期间波罗的海铯-137 轮廓显示,海水中铯-137 的活度有了增加,显然受到来自陆地尤其是瑞典的径流的影响。1986 年测得值的范围从每立方米

海水几贝可勒尔(Bq)到 2400 Bq,也就是说,比欧洲其他海域中铯-137 活度的高 2—3 个数量级。

切尔诺贝利事故后,另一个受干扰最大的海洋是黑海,其海水中的铯-137 平均活度在 1990 年达到每立方米海水 52 Bq,与爱尔兰海中的活度相近。1986 年在黑海最北端海域观测到最高的铯-137 沉降活度,约为每立方米海水 500 Bq,即比事故前数值高 30 倍。1988 年测得的黑海西部表层水体中的铯-90 活度绝大部分介于每立方米海水 10—50 Bq 之间。1988 年观测到铯-137 总体上也呈类似的分布,但其水平却高出 1 倍。铯-90 和铯-137 在爱琴海表层水体中的活度非常低,介于每立方米海水 5—11 Bq 之间。观测到的黑海表层水体中铯-90 和铯-137 的分布模式可以用下述两种主要源作用加以解释:一是事故后即处于支配地位的短期大气沉降,其次是来自基辅水库和第聂伯河、德涅斯特河和多瑙河流域的长期输入。

对地中海来说,切尔诺贝利的主要影响是随后通过与黑海交换水体造成的,后者实质上起到了放射源的作用。大气沉降和河流输入据估计起的作用一直很小。其表层水体中铯-137 的平均活度以 1990 年为参考年估计为每立方米海水 5.7 Bq。据欧洲共同体委员会的 MARINA-MED 项目估计,铯-137 在整个地区海域中的水平范围从每立方米海水 2.9 Bq 到 9 Bq,而且清楚地显示出从西向东渐高的趋势,在爱琴海达到最高值。

技术援助和培训

IAEA 一直积极地援助成员国监测和了解切尔诺贝利事故对他们的海洋系统的影响。首先,在切尔诺贝利放射性是公众最担心的与健康有关的问题之一的黑海地区,IAEA 发起了一个大型技术合作计划。计划中的活动旨在加强这一地区的成员国测量和监测海洋放射性尤其是 α 辐射体的能力,并涉及设备及培训方案的仔细评价和选择。

1994 年 11 月,在伊斯坦布尔举办了有关海洋放射性监测的为期 2 周的地区培训班。此外,一项有关同位素示踪剂在黑海中

应用的补充性协调研究计划(CRP)也一直在执行中。进行这项工作的目的是为了利用切尔诺贝利放射性核素脉冲和有关的核技术,来了解这个受到严重污染的海洋系统中的海水运动和元素循环。

在波罗的海,赫尔辛基委员会的 MORS(放射性物质监测)计划,在组织专门为海洋放射性检验而设计的海洋放射性分析质量保证活动方面,得到了 IAEA-MEL 的大力支持。1996 年 9 月将在芬兰组织的有关海洋放射性研究的 IAEA 培训班将使这一支持得到进一步加强。再者,这一工作还将包括对切尔诺贝利影响和已加入 IAEA 的新的波罗的海国家即爱沙尼亚、拉脱维亚和立陶宛的具体需要的专门论及。

海洋放射性概述

IAEA 最近完成的协调研究计划——海洋环境中放射性来源及其对海洋放射性总体剂量评估的影响(MARDOS)——使人们对海洋放射性实际情况有了大致了解。这项研究报告提供了通过消费海洋产品由人为铯-137(来源于全球落下灰、切尔诺贝利事故和经授权的排放)和天然钍-210 对公众造成的剂量的最新估计值。

这项协调研究计划包括对由联合国粮农组织(FAO)划定的若干捕鱼区域的研究。对 37 号捕鱼区域(地中海和黑海)的分析表明,海产品(鱼和有壳水生动物)中铯-137 的集体有效剂量负担 1990 年为 6 人·Sv——远小于摄取钍-210 产生的 700 人·Sv。在世界各地的海洋中,发现由铯-137 造成的最高剂量(86 人·Sv)是在北大西洋区(FAO 的 27 号捕鱼区域,也包括爱尔兰海、北海、波罗的海、挪威海和巴伦支海在内)。不过,这些剂量与摄取钍-210 产生的 2900 人·Sv 相比仍是微不足道的。

总之,可以得出结论,切尔诺贝利事故对海洋环境产生了可测量的影响。放射性核素(主要是铯-137)的水平比切尔诺贝利事故前高 2—3 个数量级。不过据估计,摄取海产品中的铯-137 给公众造成的剂量起码比天然钍-210 造成的低一个数量级。 □