

# 残留放射性核素从穆鲁罗瓦和方阿陶法通过海洋的扩散

## 从环礁到海洋

PAVEL PETER POVINEC 和 EKKEHARD MITTELSTAEDT

**模**拟放射性核素在海洋环境中的迁移是一项复杂的工作。作为有关穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁放射学状况研究工作的一部分,科学家们调查了放射性核素从穆鲁罗瓦和方阿陶法的环礁湖和地下源释放后的扩散情况。调查内容涵盖:环礁湖内的混合过程、向海洋的排放,以及向相邻岛屿的海岸和远处陆地的迁移情况。

本文重点介绍通过本项研究进行的旨在评价残留放射性核素通过海洋扩散的工作,并概括主要结论。

### 方法学和手段

为了进行模拟,将放射源周围地区(即放射性核素向海洋环境释放的地点)分为3个主要区域:近场(环礁湖)、地区场(大致包括法属波利尼西亚地区)和远场(地

海洋模拟工作组开发了两个模型。水混合模型用于估计在给定的从地下到环礁湖的释放情况下环礁湖中的放射性核素浓度和放射性核素从环礁湖到周围海洋的流速。

沉积模型用于预测沉积物在环礁湖和海洋之间的运动情况。已对平均气候条件下或严重暴风雨情况下每年离开环礁湖的沉积物数量和相应的钚量作了估计。

对放射性核素从环礁湖沉积物释放的速率作了估计,从而导出钚、铯-137、锶-90和氡从环礁湖到海洋随时间变化的释放率估计值。

为了模拟放射性核素在地区场的扩散,使用了三个区划模型。这些模型涵盖了具有不同解的不同区域,而且每个模型都有各自的长处和弱点。它们合在一起使用,可以表明扩散估计中可能存

况,使用世界海水循环的预测模型进行了评估。

这些模型产生的输出是海洋中放射性核素浓度随时间和地点变化的估计值,可以用来估计将来在不同地点和时间段对真实的和假设的人员的剂量。

### 环礁湖的模拟

环礁湖水中的放射性核素来自环礁湖沉积物中放射性物质的浸出和地下源的放射性物质迁移,其浓度取决于向环礁湖的释放速率和环礁湖水与海水的交换速率。假设放射性核素释放到环礁湖,扩散过程的前两个阶段是在环礁湖中的混合和环礁

---

Povinec 先生是设在摩纳哥的 IAEA 海洋环境实验室放射测量科科长。Mittelstaedt 先生来自德

湖水与海水的交换。已经开发出环礁湖水循环的流体动力学模型,并估计了与海水交换的平均更新时。

在评估环礁放射学状况的长期意义方面,环礁湖底部未固结沉积物(及其中的钷)的最终去向很重要。间。对于穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁湖来说,所有季节的平均更新时间估计分别为  $98 \pm 37$  天和  $33 \pm 12$  天。

为此开发了穆鲁罗瓦环礁湖沉积物迁移模型,并计算出底部沉积物通过该环礁湖流入海洋的年平均迁移率的推测估计值为每年 80 000 吨。然而,一场龙卷风能从环礁湖移走数量相当大的沉积物——一场这样的风暴可以移走约  $4 \times 10^6$  吨沉积物,其中大部分是环礁边缘的沉积物。

这一源项的年钷当量释放率估计在 0.1 TBq 左右。由于含钷沉积物不断被新沉积物掩埋,这一源项的释放率可望以 10 年降低一半的速率减小。

### 放射性核素的释放率

5 种放射性核素(氡、锶-90、铯-137 和钷 239、钷-240)对模拟工作是最重要的。分析人员考虑了环礁湖沉积物的浸出和地下源对这 4 种核素的贡献。

就以水的形式存在的氡(半衰期为 12.3 年)来说,沉积物对其没有贡献。观察到的浓度(约  $200 \text{ Bq/m}^3$ ,高出海洋本底约一倍)完全来自地下源。环礁湖中的氡浓度可能保持数十年基本不变,之后将缓慢下降。

就锶-90 来说,预期浸出和地下源都对其浓度有贡献。虽然过去观察到的锶-90 数据相当分散,但是看来该放射性核素的浓度在今后几十年可能上升到高出目前水平,不过超出量不会达一倍。

对于铯-137,目前地下源的释放与沉积物中浸出稍有关系。环礁湖中铯-137 的浓度已经以约 7 年的速率降低一半,在未来的任何时间,都不可能超过目前的水平。

就钷而言,从环礁湖沉积物中浸出是目前唯一重要来源。在观察的基础上,估计环礁湖中钷浓度将以约 10 年的速率降低一半。

根据海洋工作组提供的环礁湖和外海中这些放射性核素的测量值,估计了它们目前从环礁湖释放的速率,并对未来情况作了预测。由于从海洋规模来看,穆鲁罗瓦和方阿陶法相互靠得这样的近,以致不可能加以区分,所以没有打算把它们分别作为单独的源项。通过环礁湖的释放被认为是表层释放,而直接向海洋的释放假定发

生于 400 米深处。

氡、锶-90、铯-137 的总释放率随时间而减小,对释放率的显著贡献来自地下源项向海洋的直接释放。(见图。)另一方面,就钷来说,它的迁移很慢,地下源项的贡献在约 6000 年后将达到峰值,但该峰值将大大低于目前值。

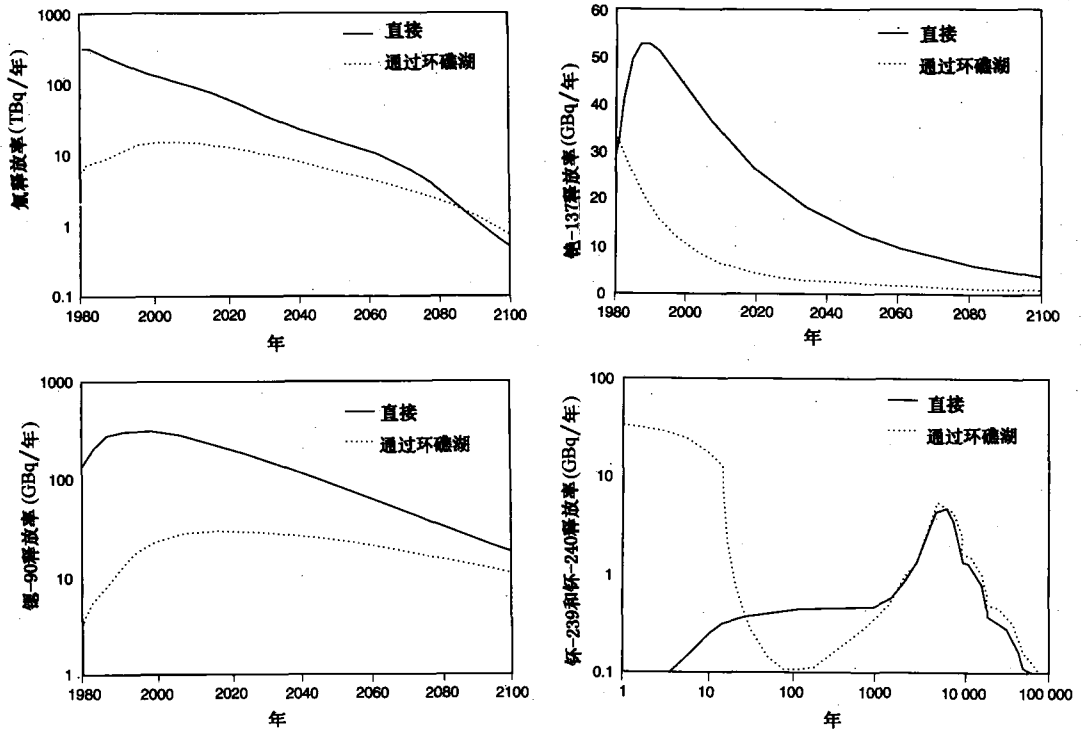
万一发生假想的破坏性事件,即碳酸盐岩体滑动,使放射性核素从地下源瞬时代放到海洋环境,估计的释放量氡为 1 PBq、铯-137 为 30 TBq、锶-90 为 10 TBq 和钷-239和钷-240 为 10 TBq。

### 扩散的地区模型

为了评估放射性核素在地区范围的扩散,开发了 3 个区划模型。范围涉及诸如图雷亚等邻近环礁和塔希提等远处环礁,并考虑长期扩散情况。这 3 个模型在空间解、对海洋中垂直结构的考虑程度和便于追踪扩散的时间方面是不同的。这 3 个模型适用于地圈迁移产生的且强度随时间而变化的“连续”源并适用于源的大部分在相当短时间(1 年左右)内释放的“瞬时”释放情况。破坏性事件的后果都可设想会发生这两种情况。

考虑了许多假想的破坏性事件,其中包括极端事件

## 穆鲁罗瓦和方阿陶法的放射性核素释放率



这些图示出氙、铯-90、铯-137以及钚-239和钚-240随时间向生物圈的预期释放率。

和由于气候变化可能导致洞穴-竖井中现有放射性物质释放率增大或环境中物质(例如沉积物中的钚)照射率增加的事件,如导致海平面下降和环礁湖湖床暴露的冰川作用,以及导致放射性核素“瞬时”释放的碳酸盐岩石滑动。

发现有必要进行详尽评估的唯一破坏性事件是假想穆鲁罗瓦环礁北部地带碳酸盐岩层出现重大破裂和滑动,因为该地带处于曾进行过地下安全试验和形成穿透

碳酸盐岩层的洞穴-竖井的核试验的区域。

地区扩散的区划模型可根据穆鲁罗瓦和方阿陶法的预期释放以及“瞬时”释放估计不同时期太平洋中不同岛屿的表层海水浓度。发现法属波利尼西亚环礁的预期浓度低于在外海观察到的由全球落下灰造成的目前浓度。

对于破坏性事件(岩体滑动),只有钚的释放浓度在最邻近的环礁(图雷亚)处高于由于全球落下灰导致的目前水平(高出约两个数量

级)。不过,10年后,预期的浓度将下降到低于目前的本底浓度。

### 远场的模拟

利用远场一般循环模型在海洋中来估计从这两个环礁释放、迁移并弥散远至澳大利亚东海岸和南美西海岸的放射性核素的浓度。该模型适用于连续源和“瞬时”源以及释放发生于海水表层和发生在温跃层下400米深处的情况。在后一种情况下,释

放的物质被截留在温跃层下,并且扩散被抑制。较高的浓度在距释放点很远的地方也能找到,但却在约400米深处。

只有在发生假想的破坏性事件的情况下(岩体滑动,在400米深处释放),图雷亚环礁海水表层中氚、铯-90和铯-137浓度才可能达到目前在南太平洋观察到的由于全球落下灰所造成的水平。

例如,对于氚来说,5年后在距澳大利亚一半距离处,其浓度的最大预期升高值约为 $10 \text{ Bq/m}^3$ ,再过5年,澳大利亚海岸外的升高值约为 $1 \text{ Bq/m}^3$ 。这些数据可以和400米深处的氚本底水平 $50\text{--}100 \text{ Bq/m}^3$ 相比较。铯的释放预期将导致图雷亚环礁海水中铯浓度达到 $100 \text{ mBq/m}^3$ 。这一数值较所有大气层核试验产生的全球落下灰导致的目前很低的海水铯浓度(约 $1 \text{ mBq/m}^3$ )高约两个数量级。在10年内,图雷亚环礁海水中铯浓度可能回落到本底水平。

在较为现实的、放射性核素随时间而释放的情况下,穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁100公里以外,预期的放射性核素长期浓度将低于海

洋的本底水平。

例如,就铯来说,在表层释放的情况下,预期释放10年后,穆鲁罗瓦附近表层水中最大铯浓度约为 $0.2 \text{ mBq/m}^3$ ,这较目前的水平低约一个数量级。

## 总 结 论

总的来说,本项研究的海洋模拟工作得出了下列结论:

- 环礁湖水的估计更新时间,对于穆鲁罗瓦来说为 $98 \pm 37$ 天,对于方阿陶法来说为 $33 \pm 12$ 天。

- 铯-239和铯-240颗粒(沉积物载带)从穆鲁罗瓦环礁湖进入太平洋的迁移速率,在平均风速和潮水涨落条件下,估计为 $8 \text{ GBq/年}$ ,发生最大风暴时为 $0.7 \text{ TBq}$ (每次风暴),最大风暴发生的频率估计为十年一遇。由于含铯沉积物贫化和逐渐被掩埋,所以风暴起因的源项可望随时间而减少。风暴起因源项造成的铯的释放较假想的破坏性事件的释放低一个数量级。

- 模拟了两个主要释放情景:(1)破坏性事件——碳酸盐岩石滑动,从碳酸盐区释放的放射性活度相当于一

次安全试验或一次洞穴-竖井试验的存量;(2)与时间相关的源项——地下洞穴中物质迁移和环礁湖沉积物中物质浸出产生的。

大部分模拟均考虑向表层水体的释放。不过,某些计算假定源项位于400米深处,模拟了从喀斯特岩层的释放。

针对这两种情景,估计了南太平洋中的环礁湖、岛屿和环礁的浓度最大升值。预期紧邻的有人居住的图雷亚环礁的海水浓度与外海由于全球落下灰造成的本底浓度不相上下。只有发生破坏性事件时铯的释放才使其浓度高出本底水平,不过这只能持续若干年。

就地下深处的释放来说,预期豪岛和塔希提岛的海水浓度高于图雷亚环礁的海水浓度。不过,即使这些地点的数据平均超过450米的总深时,它们也都低于最大值。

总的来说,模拟放射性核素从穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁向外海的扩散得到了明确的结果。这项工作表明,在附近的有人居住的岛屿处预期的浓度没有高到具有放射学意义的程度。 □