

## 通过捕获原子认识全球的地下水

(中国科学技术大学 胡水明 编译自 Zheng-Tian Lu. *Physics Today*, 2013,(3): 74)

原子阱痕量分析方法能检测同位素丰度低至  $10^{-16}$  的原子，实现可靠的定年。

利用放射性氩同位素进行定年的梦想始于1969年，瑞士伯尔尼大学的Loosli和Oeschger首先发现了空气中存在 $^{81}\text{Kr}$ 。这种半衰期为23万年的核素由宇宙射线产生，在大气中分布十分均匀，同位素丰度约 $6 \times 10^{-13}$ 。小部分氩气会溶于水或被冻在冰里，其中的 $^{81}\text{Kr}$ 由于衰变将简单地随着时间而减少，因此它对测定10万到100万年间水或冰的年代十分理想。而此年代范围超出了 $^{14}\text{C}$ (半衰期为5700年)所能应用的范围。

四十多年来，物理学家们曾经尝试了各种办法来实现 $^{81}\text{Kr}$ 测年。一种全新的方法——“原子阱痕量分析方法(ATTA)”，从15年前起就在美国阿贡国家实验室逐渐发展起来，并建成了ATTA-3装置<sup>1)</sup>。它目前每个月测量约10个氩气样品，而每个样品提取自约200升的地下水或100公斤的冰。它的应用开扩了研究方向，并将带来许多全新的认识，尤其是在气候变化研究以及水资源管理方面。

ATTA方法利用激光原子阱来捕获特定的同位素原子，进行原子计数。激光的频率准确地匹配目标同位素原子的跃迁频率，使得激光仅与该同位素原子强烈地作用，并实现捕获。一个被捕获的原子将不断地散射光子，成为一个明亮的光点，从而被相机记录下来，其特征又如此明显，使得绝不可能发生误报。

除了 $^{81}\text{Kr}$ ，地球大气中还包含另外两种长寿命的惰性气体同位素： $^{85}\text{Kr}$ ，半衰期为10.8年，同位素丰度约 $2 \times 10^{-11}$ ，产生于核裂变反应，主要在核燃料再处理时进入大气； $^{39}\text{Ar}$ ，半衰期为269年，丰度约 $8 \times 10^{-16}$ ，由宇宙射线在大气中产生。这两种核素也可用于地质分析，并覆盖不同的年代应用范围。ATTA实验装置可以准确无误地挑出同位素丰度仅 $10^{-16}$ 的 $^{39}\text{Ar}$ 原子，而不受其他任何原子或分子的干扰。然而为了达到实际应用的要求，还需通过样品预富集等方法，将 $^{39}\text{Ar}$ 探测效率再提高10—100倍。

ATTA方法将为从冰川到火山研究的诸多领域提供全新的机会：

极地冰芯研究，可以帮助地质学家们重现早至80万年前地球的气候以及大气成分。古冰不仅存在于冰层深处，还有很多因剥蚀作用而暴露在冰层表面。这些表面的古冰可以像深层冰芯一样，用于古气候研究。在2012年，由冰川学家和物理学家组成的一个联合小组，用ATTA-3分析了南极泰勒冰川的样品，证实了对古冰 $^{81}\text{Kr}$ 测年的可能性和准确性。

洋流循环是地球气候动态系统的主要组成之一，其典型的区域性循环周期恰好和 $^{39}\text{Ar}$ 的半衰期相当。因此， $^{39}\text{Ar}$ 测年能让科学家们做出更高分辨率的洋流分布图。系统性地测量溶解在洋流中的 $^{39}\text{Ar}$ ，并和 $^{14}\text{C}$ 数据结合在一起，



能填补在深层洋流循环和混合认识上的一大空白，它还可以帮助海洋学家更好地预测海洋中封存的二氧化碳。

放射性稀有气体同位素测年在水文学领域已经取得了很大进步。通过对大量水井所提取的样品进行测年，水文学家可以绘制出整个水系的地下补给图，从而更好地理解、甚至预测自然和人类活动(如抽取地下水)对地下含水层的影响。这将有助于更好地管理和利用水资源。利用ATTA测 $^{81}\text{Kr}$ 的方法，已经先后测量了非洲努比亚含水层、澳大利亚大自流盆地和南美瓜拉尼含水层，所得数据成为建立水流模型的基础。水文学家们正计划对世界主要水系进行采样和 $^{81}\text{Kr}$ 测量。此外，在美国新墨西哥州的核废料封存区， $^{81}\text{Kr}$ 测量还帮助检验了其地下水的隔离性。科学家们还能利用半衰期较短的 $^{85}\text{Kr}$ ，评价年龄在60年以内的浅层“年轻”地下水的流动和受化学污染的影响。进一步发展ATTA方法，将使得 $^{39}\text{Ar}$ 测年也成为地下水研究的标准工具。对于100—1000年这个十分重要年代范围， $^{39}\text{Ar}$ 是目前唯一可用的示踪剂，因此其意义不言而喻。

1) 中国科学技术大学的研究组参与了此工作，并在合肥建成了ATTA装置。——译者注