

放射性同位素

——揭示地下水年龄的时钟

□ 文图 / 张向阳

作者简介 张向阳，教授级高级工程师，从事水文地质、实验测试研究。

月球的年龄为 45 亿岁、阿尔卑斯山脉的年龄为 1 亿岁、人类的年龄大概是三四百万岁、故宫的年龄为 600 余岁……

那么，水的年龄呢？

在遥远的 38 亿年前，地球上就已经出现了水。直到今天，水资源宝库中的每一滴，都历经四季轮回、日月盈仄。现在，就让我们用地质科学技术来解释一下，科学家们是如何测定地下水年龄的。

地下水的年龄是研究地下水运移规律的重要指标之一。通过检测地下水放射性同位素的含量，结合放射性同位素的衰变规律，就可以得到地下水的年龄。自美国科学家威拉得·利比发明的碳-14 年代测定法获得 1960 年诺贝尔化学奖以来，放射性同位素方法被迅速引入地下水测年研究中，被认为是揭示地下水年龄的“金钥匙”。

什么是地下水的年龄

一般来说，水从进入地下环境系统开始，至流动到某一位置时所逝去的时间，被称为地下水年龄。由于不同时间进入下的水可能发生混合等作用，通常同位素测定的年龄是代表了水在地下驻留的平均时间。

通过测定地下水的年龄，我们可以判断水在含水层中的流速与周转时长。如果地下水的年龄小，说明水在含水层中流动快，周转时间短，开采后很快就能得到补充；反之，地下水周转慢，如果大量抽取，可能会使含水层疏干，引起地面沉降等

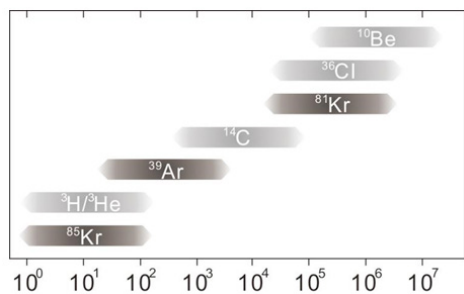
环境问题。

地下水测年还有很多用处，调查地下水的年龄有助于确定含水层的补给、径流和排泄的规律。此外，地下水年龄为古气候研究提供了时间标尺。根据这个时间标尺和地下水的其他特征，可以推演古气候的变化规律。地下水年龄还揭示了含水层的透水性强弱，可以为相关工程地质评价提供依据。

同位素与放射性同位素

同位素是指质子数相同，中子数不同的同一类元素的核素。以最简单的元素氢为例，氢有三种同位素，分别是氕（ ^1H ）、氘（ ^2H ）和氚（ ^3H ），它们的原子结构略有不同。有些同位素不稳定，会发生衰变，形成其他稳定的核素，同时释放出一定能量，这种同位素就是放射性同位素。如：氚就是氢的放射性核素。

放射性同位素的衰变是极其有规律的，这一规律被称为放射性衰变定律。依据该定律可以进行精确的地质计时，如：生命体在呼吸过程中，不断与大气中的二氧化碳进行交换，生命体一旦死亡，这种交换活动即刻停止，生命体中



> 不同放射性同位素的测年范围 / 年



的碳-14即按照放射性衰变定律开始衰变。

这种方法曾在夏商周断代工程中发挥了重要作用。该工程根据碳-14测定的年代数据,结合相应的考古信息,最终形成夏商周碳-14年代框架。这是迄今为止我国最具科学依据的古代历史年表。这个年表,为我国公元前841年以前的历史建立起1200余年的框架。

放射性同位素测定年龄简单高效,于是科学家们称放射性同位素为“地质时钟”。

放射性同位素的原子数衰减到原有数目的一半所需要的时间称为半衰期。不同的放射性同位素具有不同的半衰期:例如钋-215的半衰期仅有0.0018秒,铀-238的半衰期却长达45亿年。半衰期短的放射性同位素适合于短时间尺度的地质事件年代测定,反之,半衰期长的放射性同位素适合于长时间尺度测定。目前用于地下水测年的放射性同位素有 ^3H (氚)/ ^3He (氦-3)、 ^{14}C (碳-14)、 ^{36}Cl (氯-36)、 ^{39}Ar (氩-39)、 ^{81}Kr (氪-81)和 ^{85}Kr (氪-85)等,其中 ^{39}Ar 、 ^{81}Kr 和 ^{85}Kr 为稀有气体放射性核素。这些同位素的组合基本上可以覆盖0~100万年尺度的测年范围。

地下水放射性同位素的检测方法

放射性同位素目前主要采用低本底辐射计数以及加速器质谱等技术测量。

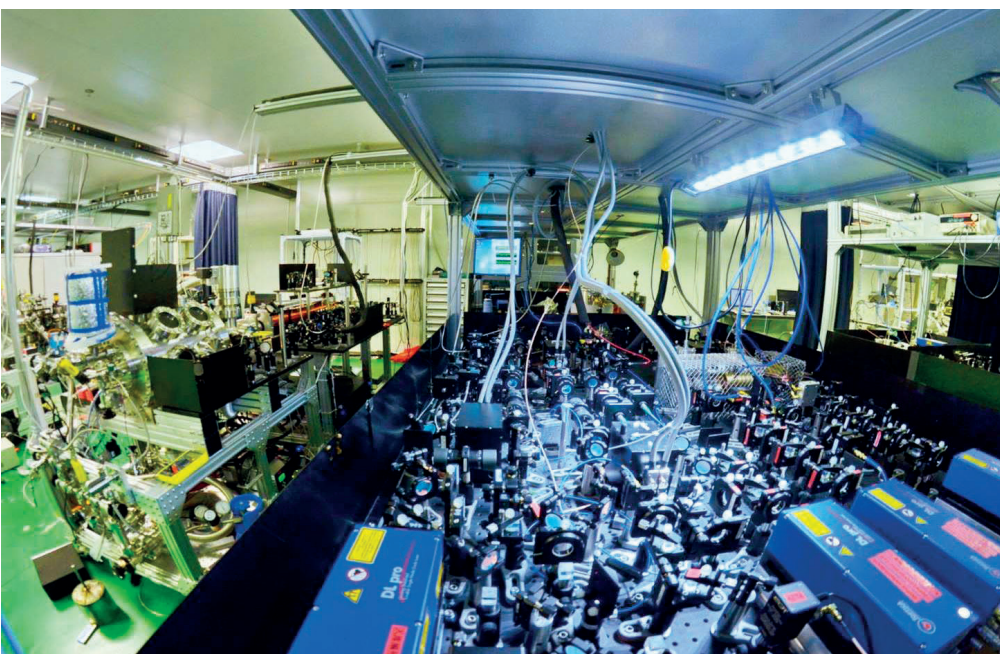
低本底辐射计数是最早用来进行痕量放射性同位素的检测方法之一,其原理是通过测量样品中放射性同位素的衰变产生的射线来确定它的放射性活度。这种方法可以测量地下水中的氚、碳-14等核素。

此后发明的加速器质谱则是一项革命性技术,其大幅度地提高了分析碳-14等同位素的灵敏度与可靠性。更重要的是这种技术需要的样品量极少,这是辐射计数技术不可比拟的。这一点对于考古、古生物等样品尤为重要,就象微积分的发明对于物理学发展一样,加速器质谱技术是这些学科进入定量时代的重要标志之一,极大地推动了这些学科的发展。自20世纪70年代末期被发明以来,这一技术已经为地球、环境科学及考古做出了巨大贡献。加速器质谱可以测量碳-14、铍-10等核素。

值得一提的是,当前科学家们针对地下水中的氪-81、氪-85和氩-39的测量方法已经取得重大突破,这一方法被称作原子阱痕量分析。首先是选择



> 加速器质谱中心的加速器质谱装置



> 痕量惰性气体同位素激光冷却原子阱探测装置

问题：这三种同位素来源单一，因为以气体形式存在于环境中，混合均匀度好，又因惰性导致其在环境中不与其他成分反应，避免了不确定因素，因此在进行地质应用时模型简单而且可靠。其次是操作问题：该方法采用激光冷却的方法使原子在真空腔中沿一定方向减速飞行，飞行到末端的磁光阱时，飞行速度减小到 0，好像被囚禁在陷阱中；被磁光阱囚禁的同位素原子通过荧光计数，可以准确地数出原子的个数。通过利用不同波长激光和不同的同位素原子共振，使得这种方法具有极高的选择性。这种仅需要几升到几十升地下水样品，就可以实现氦-81、氦-85 准确测量。在此之前，科学家们曾尝试用大型超导回旋加速器测量氦-81，代价极为昂贵，测量效率却很低（测量一个样品需要 16 ~ 20 吨地下水）。目前科研人员采用同样的原理测量氦-39 也取得重大进展，并已经开始实际样品测量。

放射性同位素测年在地下水研究中的应用

地下水年龄与含水层结构、径流长短、介质性质、补给强度等都有很大关系。

2013 年以来，科研人员采用放射性同位素氦、碳-14、氦-81 等方法，对河北平原 100 ~ 700 米深度的地下水年龄重新展开研究。最终得到以下认识：河北平原地下水发源自太行山区，自西向东流动，

流到石家庄市大约 100 米深度的地下水年龄 10 ~ 30 年，到沧州附近 300 ~ 500 米深度的地下水年龄为几万年到几十万年，流到滨海平原 500 ~ 700 米深度的地下水年龄为几十万年至一百万年；其中滨海平原这部分年老的地下水被称为“化石水”，是过去地质历史时期形成的地下水资源，而且这部分古老地下水是目前该地区工农业生产和人民生活的主要淡水资源。如果无节制开采，滨海平原这部分地下水将不可持续，因此我们必须科学合理地开发和保护这类珍贵的地下水资源。

大部分天然环境示踪剂测年方法提出的年代均较早，并有不同的测年范围，但因分析技术的限制，至今尚未全部获得普及应用。目前，随着分析技术不断进步，早期提出的这些地下水测年方法的应用已逐步取得进展，成功的尝试性应用实例逐渐增多。随着人类工农业和生活的发展，又出现了一些新的示踪剂，有待人们继续发现和探索。

建立完备的地下水测年应用技术体系，可构建我国主要平原与大型盆地地下水年龄结构，为地下水资源可持续利用提供依据，并且可提高水资源管理与决策的科学性。■

作者单位 / 中国地质科学院
水文地质环境地质研究所

（本文编辑：王依卓）