

同位素在水文学和地学中的应用

某些国家正在应用稳定和放射性元素帮助示踪和解决水文问题

Roberto Gonfiantini 和 Gert Hut



利用同位素的核技术可用于研究水资源，这是一种精密而现代化的手段。这种技术对于回答给定地区的水的起源、分布及性质等问题，能提供比较恰如其分的答案，特别是当把它们与水文学家、水文地质学家、地球化学工作者掌握的所有其它手段结合起来使用时，效果更好。

水文学领域之所以能使用同位素进行高水平的研究，基础之一是 W. F. Libby 于 1946 年揭示的碳-14 和氡的天然丰度，基础之二是 H. C. Urey 和 J. Bigeleisen 于 1947 年发表的关于稳定同位素分离效应的实验和理论工作。虽然在当时的短短几年内就出现了关于水中同位素的天然丰度的首批出版物，但是直到本世纪 60 年代初，同位素水文学才成为一个独立的研究领域。

原子能机构于 30 年前创立不久，就在许多知名科学家的鼓动下，开始涉足这个领域。幸运的是，这正好与同位素技术应用领域的这一飞速发展同步。

这种发展现在都已记载在关于利用同位素技术开发水资源的七次专题讨论会的会议录中。这些专题讨论会都是由机构组织的，其中有几次是与联合国教科

文组织共同举办的。第一次专题讨论会 1963 年在东京举行；最近一次专题讨论会则于 1987 年 3 月 30 日至 4 月 3 日在维也纳举行，出席这次讨论会的有来自 45 个国家和 3 个国际组织的 160 多位科学家。

人工和环境同位素

理想的水示踪剂具有的性质应该尽可能与水相似，同时容易被探测到——尽可能在现场探测到——并且能够比较容易地被注入到某一水文地质系统的广大地域。

发射 γ 辐射的人工同位素具有某些这样的性质——它们容易被探测到；而环境同位素——测量它们比较困难——能通过各种自然过程不断地注入到整个水文系统中。

氡、氘和氧-18 等一类同位素是水分子的一部分，因而具有同水文系统内的总的水体相同——或几乎相同——的行为特性。

同位素水文学这一特殊领域是建立在辐射与物质相互作用的基础上的。一个典型的例子是，放射源发射的辐射可以被依靠河水搬运来的悬浮态沉积物所吸收，被吸收的辐射正比于悬浮沉积物的浓度。利用这种技术已获得了关于沉积物搬运的重要资料。

在进行调查研究和将同位素用于专题研究的 30 年中，已积累了相当数量的资料 and 知识。因此，一位优秀的同位素水文学家应该能够为所要解决的水文问题挑选最适宜的同位素和技术。例如，把人工同位

Hut 先生和 Gonfiantini 先生都是国际原子能机构物理和化学处同位素水文学科的职员。

图中显示正在努力评估非洲干旱国家和其它区域的水资源。（来源：法国地质和矿山普查局(BRGM)）



氟气制备系统是维也纳国际原子能机构同位素水文实验室的分析工具之一（来源：Katholitzky, IAEA）

素注入到某一水文系统的给定点，并且在该系统的另外一些预计这种同位素会出现的点上（一般离得不太远）监测它们。从注入至探测到这些同位素的这段时间及各探测点的同位素浓度分布图的形状，就能详细而精确地提供有关该水文系统（试验期间该系统处于主导条件下）行为特性的信息。因此，正确地设计好这种试验要有相当高的技巧。

对于环境同位素，情况则不同。它们或是天然的，或是人造的（或二者同时存在），但它们在水文循环中的分布都受自然过程的支配。因此，它们的注入不断地（至少在很长时期内）遍及整个水文系统。一般利用环境同位素研究大型水体——河流、湖泊、地下水等，可取得关于这些水体主要特性的结论，这些结论可以在比较长的时期内有效。关于环境同位素的理论基础和数据解释，通常相当复杂，需要有丰富的经验和多种学科的知识。

对于含水层内的地下水，通常能够利用氘和氧-18（两者均为稳定同位素）的浓度来区分不同的水体和确定水的起源。之所以能这样做，是因为它们与从含水层补给区内渗入的雨水中的相应稳定同位素的浓度有关。有时，含水层内的稳定同位素浓度能够与具有不同气候条件的某一时期的渗入联系起来。

来自起源于山脉的河流水和来自当地的雨水，二

者的稳定同位素成分不同，这一特性可被用来确定地下水中河水和雨水的搀合比例。湖泊中停滞水的稳定同位素成分的变化，常被用来测定湖泊的蒸发率。

水的年龄测定

人们感兴趣的一个重要参数是水在含水层内的存留时间，也称作水的“年龄”。在解决所研究的水在多长时间以前与大气接触过这样一个问题时，有好几种放射性同位素能起作用（取决于它们的半衰期）。地下水非常年轻，意味着地下水的再补给可能来源于某一年的降雨，而在旱季之后可能随之发生地下水短缺。地下水非常古老，这可能意味着地下水不存在再补给，因而开采价值不大。

氙是氢的一种放射性同位素，半衰期为12.43年，天然丰度非常低，数量级为几皮居里每升。由于20世纪50年代和60年代进行过多次大气层的热核炸弹试验，降水中氙的浓度急剧增加，有时几乎达到天然水平的1000倍。在《部分禁止核试验条约》签订之后，氙的浓度逐步恢复正常，现在几乎同热核炸弹试验之前相等。这种氙一旦进入地下水，它的“信号”就可以用来判别这部分水是热核炸弹试验之后还是之前的。

半衰期为5730年的碳-14是测定年龄最常用的一种环境同位素。有一个大的问题是，碳原子不是水分子的组成部分，只是溶于水中的碳酸氢盐离子的一部分。为此，不得不考虑水化学问题。

据认为，地下水中的碳酸氢盐由来自不同的两个来源的碳组成：一种来自土壤中的腐殖质，随降水渗入地下；一种来自含水层内被地下水溶解的海相碳酸盐。第一种碳含有碳-14，因为它与土壤中植物呼吸和生成有机物时产生的二氧化碳相平衡。海相碳酸盐不含碳-14。要测定年龄，一定要知道最初碳-14的浓度和近期渗入水中的碳-14浓度。因此，已经开发了几种确定“现代”碳和“古老”碳所占份额用的模型。举例来说，在这些模型中就利用了腐殖质和海相碳酸盐所含的碳浓度不同这一性质。

碳-14的半衰期使年龄测定范围限制在将近50 000年。现代碳中，碳-14的浓度已经很低（ 10^{-12} ），以至惯用的做法是用衰变计数进行测量。在大约10个半衰期之后，碳-14的浓度是现代碳中相应浓度的千分之一，衰变计数分析技术就达不到所要求的精度了。加速器质谱法的发展，原则上能够使年龄测定范围超过50 000年，而且可以使用尺寸更

小的样品。串列式范德格喇夫加速器可以借助这种技术直接读出碳-14 离子的个数来。可是，实际上，由于机器有污染问题，使年龄测定范围限制在和衰变计数法一样的范围内。

为了扩大年龄测定范围，必须寻找半衰期更长的同位素。例如，半衰期为 305 000 年的氯-36。据认为它的水化学性质和地球化学性质比较简单。但是，氯-36 的浓度很低，以致为了进行衰变测量必须先处理大量的水。加速器质谱法的发展改善了这种情况，因为需要的氯量少多了。在最近 5 年左右的时间里获得的结果说明，在许多情况下，地球化学问题比预计的要复杂的多。

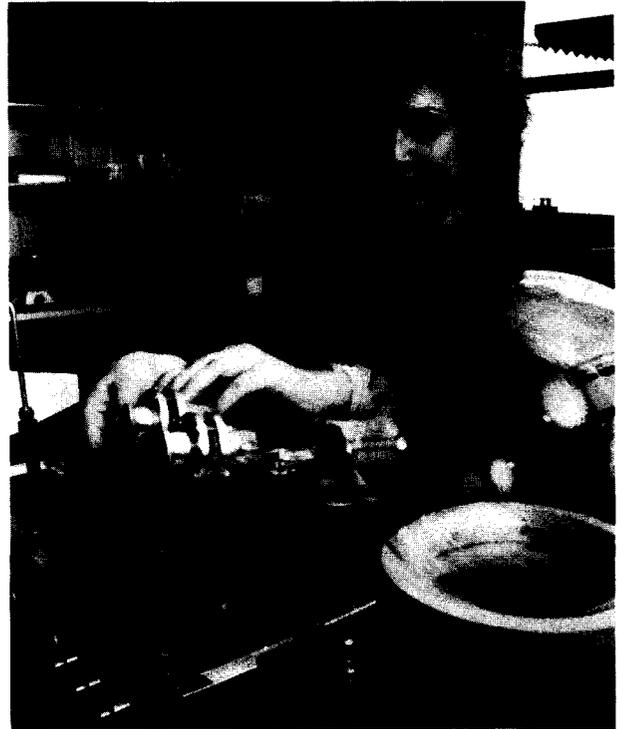
可是，在某些情况下，还是获得了令人鼓舞的结果。在“澳大利亚大自流水含水层”成功地应用了氯-36 测量法就是一例。这个领域的发展使得能够研究象撒哈拉大陆夹层 (Continental Intercalaire) (约 60 万平方公里) 或象巴西的博塔凯图 (Botacatu) (约 100 万平方公里) 那样的大型含水层。

原子能机构的支助和活动

同位素技术在水文学方面的各种应用，自始至终得到了机构的支助。这种支助包括提供进行这方面工作的专家、设备和培训，以及直接给有关国家提供各种必要的分析支助。但是，就环境同位素应用而言，只有屈指可数的国家拥有进行这种分析的实验室能力；若某个国家没有这种能力，可以在设于维也纳的机构同位素水文实验室进行分析。原子能机构还鼓励开发新技术和改进早已使用的技术，一方面改进分析技术，另一方面使解释数据用的理论方法更加完善。

在机构支助下实现的各种应用实例数不胜数，其中最重要的几项应用是近几年做完的，或目前正在做的。

• **北非。** 在 20 世纪 80 年代初，联合国开发计划署 (UNDP) 在北非的三个马格里布国家——阿尔及利亚、摩洛哥和突尼斯开辟了一个项目，目的是评价水资源，特别是地下水资源，因为这三个国家处于干旱或半干旱状态。此外，这项计划的一部分专用于开发增加水资源的技术。例如：地下水的人工补给；利用过的水的净化和重新使用；评价土地侵蚀及随后出现的可使人工水库寿命大大缩短的悬浮沉积物的运输。机构于是决定，在这三个国家设立一个平行的区域性项目，因为这可以利用已经为 UNDP 项目建立起来的重要基础设施，将同位素技术用于研究这



葡萄牙 Gonç \tilde{a} o Ribeiro Vieira 的 Maria 女士 (来源: Katholitzky, IAEA)

方面的某些问题。因为这对于 UNDP 和机构双方都有利。在突尼斯和阿尔及利亚的撒哈拉进行的研究，旨在测定两大含水层——大陆夹层和复杂终端 (Complexe Terminal) ——中的地下水的年龄和动力学特性。从原则上讲，这一工作可能有助于建立数学模型和制定开采计划。鉴于这部分地下水是在 30 000 多年前的更新世灌入的，非常古老，故现在准备利用氯-36 作为年龄测定的工具。

在马拉喀什附近的 Wadi N'Fis 河床上，利用人工同位素研究了水在地下水补给区试验渗入场里的运移规律。这些研究表明，由于水循环节短，悬浮沉积物在头一个盆地的倾析和沉淀作用没有按照所要求的效率进行。后来对头一个盆地的构形做了适当的变动，使沉积物能在这个盆地而不在下一个盆地沉积下来，减少了渗入率。

在突尼斯附近的一个场地，将氟化水与用过的水一起重新注入地下，以便检查土壤净化效率和重新注入的水在含水层内的传播情况。这项工作尚未结束，但截至目前的结果足以证明这种方法是有效的，尤其是证明了氟作为水的理想示踪剂的有效性。

• **亚洲和太平洋地区。** 在几个国家和几个地区内,有一些同位素水文学的协调研究计划,由机构成员国提供资金,由机构组织实施。在亚洲和太平洋地区,一项由澳大利亚提供资金的计划,包括了大韩民国、印度尼西亚、泰国、马来西亚和斯里兰卡等国的一些研究项目。这项计划将于今年以在中国举行的工作会议而告结束。

• **拉丁美洲。** 另一项由德意志联邦共和国提供资金的协调研究计划,旨在使水文学同位素技术在拉丁美洲逐步利用起来,有10个国家参加了这项计划,它们是阿根廷、玻利维亚、巴西、智利、哥伦比亚、古巴、多米尼加共和国、厄瓜多尔、危地马拉和墨西哥。这项计划将于1987年以在墨西哥城举行的讨论会而告结束。第三项由意大利提供资金的协调研究计划,旨在显示同位素和地球化学技术在开采地热方面的潜力;这项计划还是集中在拉丁美洲,参加者有阿根廷、玻利维亚、哥伦比亚、哥斯达黎加、厄瓜多尔、危地马拉、秘鲁和委内瑞拉。大多数拉丁美洲国家有丰富的地热资源;不过,到目前为止,仅墨西哥和萨尔瓦多开采了地热。墨西哥很快会参加这项计划,现在它是世界上继美国和菲律宾之后意大利之前,第三个利用地热发电的国家。*

干旱国家的水资源

机构一直特别注意评估干旱国家的水资源。事实上,同位素是调查地下水是否得到过补给和辨别是不是古地下水——也就是地下水是否在过去湿润气候条件下得到过补充——的最有效的工具之一。**在机构支助下,非洲和亚洲的许多干旱国家已在开展这方面的研究。最近已开辟了两个区域性项目:一项在西部非洲的三个国家——马里、尼日尔和塞内加尔;另一项在东部非洲,包括埃及和苏丹。这第二个项目

* 见“Isotopes in geothermal energy exploration”, *IAEA Bulletin*, Vol. 25, No.2 (1983)。

** 见“Investigating water resources of the desert: how isotopes can help”, *IAEA Bulletin*, Vol. 23, No.1 (1981)。

由德意志联邦共和国提供资金。

培训支助

培训工作也得到机构强有力的支助。今年,同位素水文学科首次组织小组培训,包括讲课、实验室培训及参加野外项目的科学工作等。来自阿尔巴尼亚、埃及、哥伦比亚、葡萄牙、菲律宾、约旦、苏丹、塞浦路斯和印度尼西亚的培训金享受者正在参加这项培训试验;如果获得成功,将再次组织这种培训,使更多的培训金享受者能够参加。

水资源会议引起极大兴趣

为了帮助解决实际问题,水文学家、地球化学家及其它科学家,正在愈来愈多地利用稳定同位素和放射性同位素作为研究含水层、湖泊、水库、河流和港湾的有用的有时是独一无二的手段。同位素是存在于环境中的或人工制造的元素。人们把它们用作了解水的性质和特性,及评估不同气候与地理条件下水的供应前景的示踪剂。此外,它们还被用来研究诸如水和沉积物的运动、盐碱化及污染等问题。比较重要的稳定同位素有氘(氢-2)和氧-18,放射性同位素有氚(氢-3)和碳-14。

来自45个国家和3个国际组织的160多位科学家和研究人员,在维也纳举行的一次国际专题讨论会上,审议了这种核技术和相关技术在水文调查中的应用情况。这次会议是由原子能机构和联合国教科文组织联合发起的,会上提出了许多研究报告和论文,内容为目前正在非洲、欧洲和拉丁美洲等地区30多个国家进行的室内研究和野外研究。这次会议是1963年以来,由原子能机构为促进交流这一重要领域内的科学情报和研究成果而组织的一系列会议中的第7次。机构通过其技术合作计划、研究合同和其它渠道,也一直在提供直接的经济支助和专家援助,以帮助发展中国家有成效地将这些技术和手段用于解决当地和地区的水资源问题。

会议文献汇编将在今年晚些时候出版。

