

研究污染物在地下水中迁移规律的核技术

核技术在防止水资源污染方面的某些实际应用

V. T. Dubinchuk、A. Plata-Bedmar 和 K. Froehlich

近年来，防止地下水资源受到污染一直是人们高度优先考虑的课题。

地下水通常比地表水纯洁，因为它受到了极好的天然过滤系统的保护。该系统包括土壤、粘土和砂砾层，它们可去除某些可溶性物质、悬浮颗粒、细菌、和大部分病毒。

然而，如果这样一种过滤系统超载或被旁路，则地下含水层本身就可能被污染。影响地表水的那些污染物——包括生活废物和工业废物、化粪池的渗出物、矿山污水、垃圾掩埋物和农用化学品——也许对地下水的影响更大，影响的时间也更长。污染物一般要在含水层中保持数百年至数万年之久，因而会危及今后许多代人的水供应。

某些地区的含水层受到污染的程度比其它地区的轻，原因在于这些地区的地质条件和水文化学条件能限制被污染的风险。地下水对引起污染的人类活动的敏感程度被称作“含水层的易污染性”。各色各样的过程以及土壤和含水层的性质，都会影响含水层的易污染性。测定表征这些过程的参数，对模拟和预测污染物在地下水系统中的迁移规律是必不可少的。其主要目的是阻止地下水资源被污染和水质下降，或在污染已发生后查明其起因以便提出补救措施。

在国际原子能机构（IAEA），工作重点一直放在与解决地下水污染问题有直接或间接关系的核技术

和同位素技术的实际应用上。本文介绍这些核技术和同位素技术在实践中的应用情况。

污染物的迁移

不饱和带（饱气带）是地质体的一层薄“皮”，污染物就是通过它开始从地球表面向地下浅含水层迁移的。研究地下水和污染物通过土壤迁移的速度，需要使用专门的仪器。在某些国家的和国际的（包括IAEA赞助的）计划中，使用这类仪器和同位素示踪剂的一些调查研究已经完成或正在进行。

例如在克里米亚地区，1985—1986年进行了调查地下水盐化的研究。在切尔诺贝利地区进行的调查主要是想弄清楚1986年核电厂事故释放的放射性核素的迁移情况。*

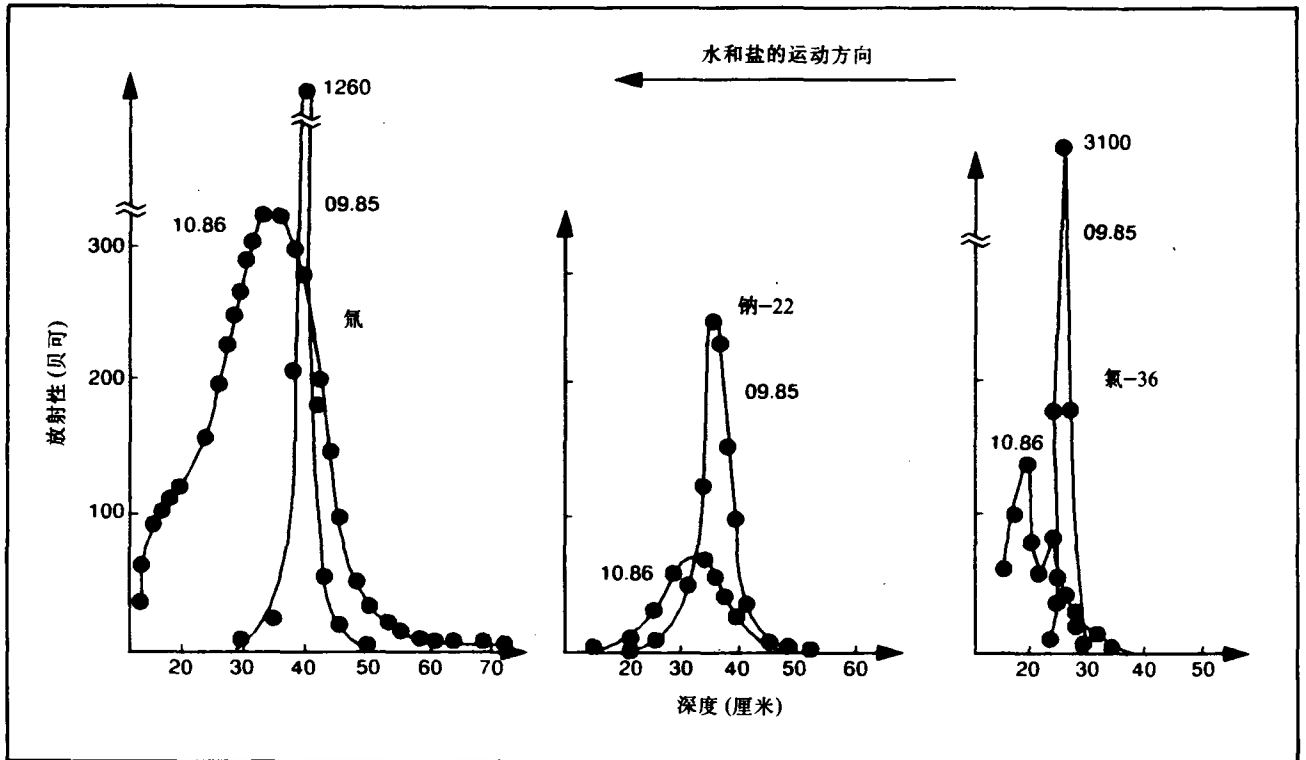
在这两项研究中，建造了一些供复杂的同位素示踪研究用的场地。在这些场地，把含氚的水注入地下，研究这些水在土壤中的空间和时间再分布。这样做的目的在于测量地下水在不饱和带中的运动速度，估计地下水的滞留时间（或年代）和它对浅含水层的补给速率。在同一些场地还同时注入用同位素标记的污染物，观察它们的移动情况。

在克里米亚，在赞科伊附近得到的结果表明，盐是向上输送的。其原因是土壤水分蒸发量较高，地下

Dubinchuk、Plata-Bedmar 和 Froehlich 三位先生都是 IAEA 物理和化学处的工作人员。

* 这两项研究都是在位于莫斯科的全苏水文地质和工程地质科学研究所由 V. T. Dubinchuk, Yu. A. Tsapenko, A. V. Borodin 和 A. V. Gladkov 等研究人员完成的。

图1 在克里米亚进行的三重示踪剂实验



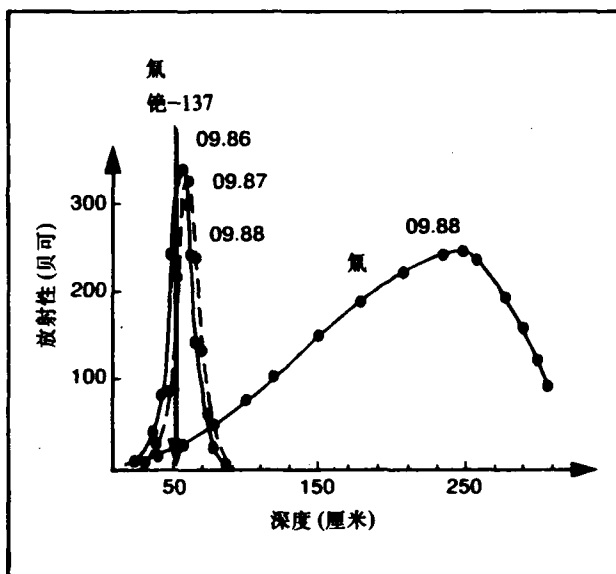
水位又较浅。(见图1。)该实验是利用三重示踪剂方法(使用放射性钠-22和氯-36标记的氯化钠的氟化水溶液)进行的。

然而,在附近有很厚的饱气带的其它场地,类似的实验曾显示出盐是向下渗透的。这项研究在水以及

钠和氯离子的就地迁移方面,提供了非常有用的资料。从该地区的农业观点看,这些资料是非常重要的,因为它可以使人们更好地了解土壤盐碱化的机理和动态特性。

在切尔诺贝利地区,做了一个使用双重示踪剂(氟化水和用铯-137标记的氯化铯溶液)的实验。在规定的几个深度同时注入这些示踪剂,以便获得预后性的数据。(见图2。)这些结果相当明显地显示出,相对于水来说铯有停滞和弥散效应。由此,人们可较好地估计这种放射性核素污染地下水的风险。

图2 在切尔诺贝利附近进行的双重示踪剂实验



被污染水的侵入

被污染的水从天然的和人工的湖泊、溪流或水库侵入地下水体的问题,是水管管理中的一个典型问题。

在尼加拉瓜的马那瓜市附近,正在IAEA技术合作项目的范围内研究侵入问题。这些研究都是以综合应用(放射性的和稳定的)环境同位素和人造示踪剂为基础的。

在马那瓜市,阿索索斯卡湖是4个主要泵站之一的水源,该泵站向当地居民供应的水占全部供水的60%。而邻近的面积更大的马那瓜湖的水已被严重

核技术和同位素技术

各种各样的核技术和同位素技术，都可以对回答地下水流动和污染物迁移方面的一些具体问题作出贡献。

在诸多的核手段中，核测井技术起着重要作用。这项技术以利用核辐射（ γ 、中子等）就地测定土壤和岩石的物理—化学性质为基础。 γ 测井技术用于评价来自土壤的天然 γ 辐射，由此可测定土壤中的粘土和碳酸盐的含量及其透气性。 γ - γ 测井技术主要是测量人造源发出的 γ 辐射的散射情况。沿被测井上下测量散射辐射，可得到有关土壤整体密度的信息。中子测井技术可提供有关土壤水含量的数据。把 γ - γ 测井技术和中子测井技术结合起来，可评价土壤的许多特性，包括孔隙度（在饱和土壤中）、土壤基体密度和水的流动速度与扩散率（在不饱和土壤中）。有时，这种综合测井技术也有助于评估固结岩石中的裂缝。

在同位素技术中，为了追踪水及其组分的运动情况，可利用自然力或由科学家人为地把示踪剂注入给定的水系中。

示踪剂的应用已有相当长的历史。简单的示踪剂，例如树叶、木屑和切碎的稻草，早已被用来观察水的流向和流速，以及河流与水库之间的相互联系。后来，演变成使用各种天然的和人造的颜料和染料，并且沿用至今。

随着电导测定法和比色法的出现，示踪技术在19世纪末和20世纪初有了惊人的发展。这些技术使人们可在现场用仪器测量作为水示踪剂的盐类和染料。在多瑙河—莱茵河地区、克里米亚和迪纳尔的喀斯特地区，以及其它地区进行的水文学示踪实验，都是当代水文学家使用盐类和染料的实例。

然而，示踪技术只是在发现了同位素和引入了相应的测量设备之后，才达到了现在这样的发展高度。

同位素可被用来研究大多数类型的污染，其部分原因是可获得的同位素的种类很多。有时它们是一种比其它示踪剂好得多的、相当神

奇的工具。

对水分子、污染物颗粒或同时对两者都可进行同位素示踪。可在局部、地区、甚至全球范围进行微观和宏观的迁移实验和观察。水和污染物可在被研究条件和过程不受任何干扰的情况下加标记。应用同位素示踪剂的实验可在其它示踪剂无法适应的极端条件（非常稀薄、高度矿化、混浊、湍流、低温和高温）下进行。此外，陆圈和水圈中还存在着种类繁多的天然同位素，它们都可成功地被用于示踪环境中的迁移过程。

同位素技术的一个重要优点是提供了这样一个机会，即可定性和定量地评估被人称之为地质介质阻碍污染物运动的“阻滞参数”。阻滞主要是指使污染物相对于水的运动而言的迁移速度变慢。这是一种很复杂的现象，涉及吸附/解吸、扩散/分散、溶解/沉淀和其它的许多过程。

可同时用不同的同位素作示踪剂，以评估阻滞效应。“双重示踪剂”技术可用氡（氢的一种放射性同位素）作水运动的示踪剂，同时用另一种相关同位素作为特定污染物的示踪剂。这些技术可给评估阻滞效应提供宝贵资料。

把实验室方法（分批法、塔柱法和射线照相法）和野外示踪实验（使用人造和环境同位素示踪剂）结合起来，可得到最佳结果。分批实验包括在水力学静态条件下观察标记组分在模拟溶液和土壤/岩石样品之间的重新分布。这样，吸附/解吸等值线，吸附分配系数，以及它们随水文地球化学、污染物和土壤性质而变的关系，都可得到研究。值得指出的是，最近已用分批示踪实验得到了有关放射性核素和金属离子的吸附性能的大量数据。

塔柱技术是以测量流过土壤/岩石物料柱的标记组分的空间—时间分布为基础的。使用这种方法可同时求得在不同水力和动态条件下的水力运输、吸附/解吸和扩散/分散参数。同分批技术相比，塔柱实验的数据与天然系统

的实际情况更为接近。

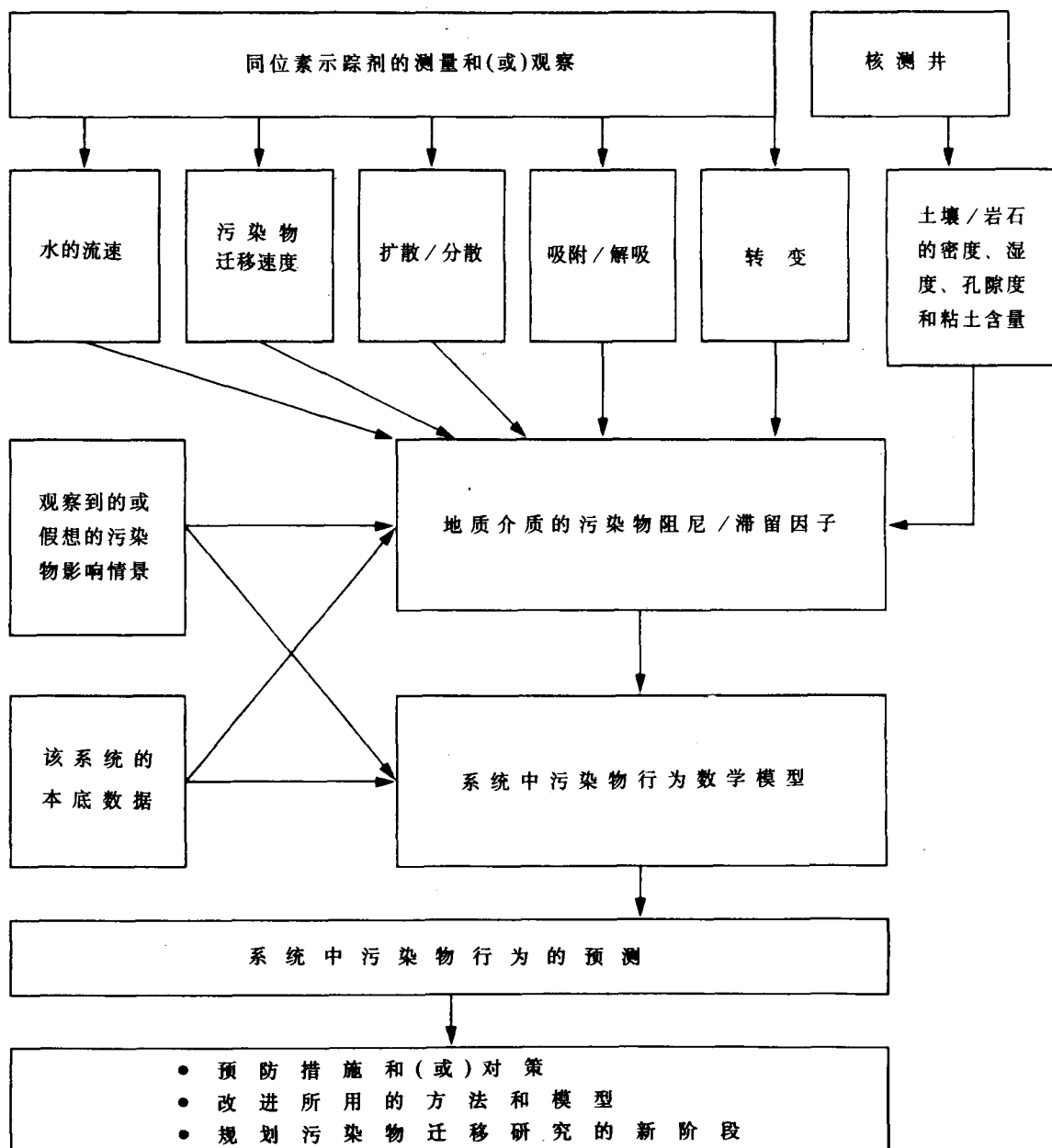
野外实验是最可取的技术。为了求得野外条件下的阻滞参数，通常要做多重示踪剂实验。这些实验一般使用人造氚作为水本身的示踪剂，同时用另一同位素标记起反应的溶质（污染物）。通常，进行此类实验所需的样品氚浓度是几十贝可/升量级。

一般说来，使用人造同位素作示踪剂的野

外实验，能够帮助处理一些局部问题，如：

- 保护特定的取水地区。其主要目标是预测污染物到达含水层源地还要多长时间。
- 调查和预测废物处置场和大型工业联合企业周围地区的地下水污染。
- 评价人工补给系统中水的动态特性。
- 研究和预测盐类和农用化学品在土壤和地下水中的迁移和行为。

图5 在污染研究中应用示踪技术的方案



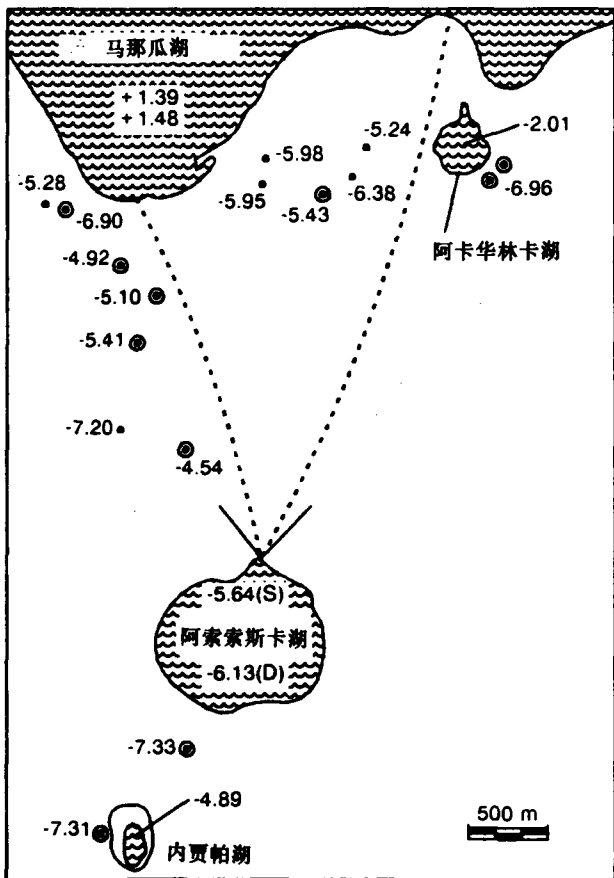
污染。(见图 3。)

阿索斯卡湖是一个古火山口，最大深度约 90 米，直径约 1000 米。该湖的水来自有可能靠马那瓜湖补给的地下水流。由于过去几十年大量抽水，全部 4 个泵站的地下水位都低于马那瓜湖的水位。这就使被污染的水有可能从马那瓜湖侵入地下水和阿索斯卡湖。

为了检验这种可能性，曾做过一项测量地下水的流动速度及其各项参数的研究。研究包括分析水中的环境同位素（氘、氦和氧-18）及其化学成份，并进行人造示踪剂实验。

结果表明，被污染的水并未发生可测出的侵入。研究显示，马那瓜湖水和地下水的同位素组成极不相同。此外还发现，现正从阿索斯卡湖抽取的水是较古老的。之所以能作出这种判断是因为水中没有可测出的氦。（因为氦是 1952—1962 年间的核武器试验释入大气的，它可能被用来确定水资源的年龄和辨别水资源近期是否通过雨水渗透得到补给。）还测出阿索

图 3 尼加拉瓜的污染侵入同位素研究



注：数据是氧-18 值，以偏离维也纳 SMOW 标准值的千分率为单位。

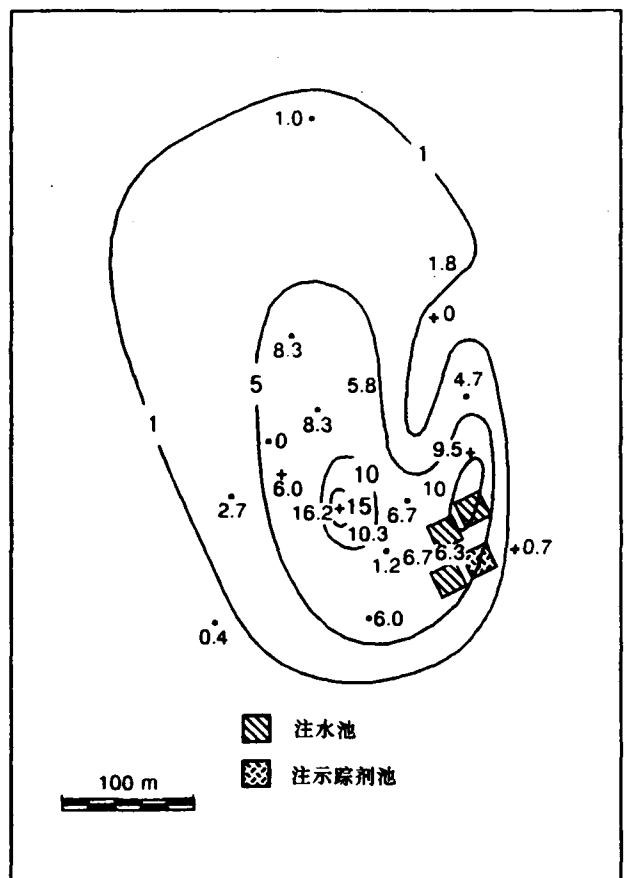
索斯卡湖水的同位素组成与深层地下水的一样。现在可以有把握地说，根据这些同位素信息，因水力学条件变化而可能发生的马那瓜湖被污染水侵入阿索斯卡湖的问题，可以提前很久就探测到。

人工补给废水

在突尼斯，曾实施过一项旨在研究用人工方法向纳博伊尔-哈马梅德的滨海冲积含水层补给废水的项目。该含水层由于大量抽水和盐化，实际已经枯竭并已废弃。为研究含水层在较长时期内（14 个月）的自我净化能力和新老水资源之间的混合过程，补给用水用氘作了标记。

在这些研究中，使用在 42 天中连续注入示踪剂氘的方法，给大约 32 000 立方米的废水加标记，加标记后废水的平均活度为 1.2 千贝可/升。从加标记水在实验开始后第 394 天的空间分布，可看出水的运动状况。（见图 4。）这些信息将使人们能更好地规划

图 4 突尼斯的废水补给同位素研究（氘等值线）



注：氘等值线以微居里/立方米为单位。

未来的、目的在于将废水用于灌溉的大规模人工补给废水项目。柑桔类水果、水稻和蔬菜是该地区的主要作物。原先的结论是只有将废水与别的低矿化水混合，才能将补给水用于灌溉。

优点与问题

同位素示踪剂提供了一个窗口，通过它可以观察标记污染物（以及加标记的任何其它水组分）同致密土壤/围岩或加载的、推移质或悬浮的物质接触时发生的变化。对污染物在地质介质中运动、转变和相互作用的各个阶段，都能进行跟踪。

其次，同位素示踪剂能以化学上极低的浓度使用，因此不会扰动被研究系统的物理—化学条件和热力学条件。它们在数量少到常规手段无法测出的情况下，也能被测出来。

最后一点，示踪实验可以用非破坏性的方式进行。例如，可在实验室的塔柱实验装置上研究扩散和吸附，而不必破坏土壤和岩石样品。在野外，使用 γ 示踪剂和 γ 测井技术也能比较容易地进行类似的试验。

然而，同位素示踪技术也有某些问题和局限性。因此，在污染迁移这一研究领域，科研重点正在从开发和改进特定的同位素示踪技术，转向示踪技术与传统方法相结合的综合利用。作这种变化，目的在于提供作出有关预测和提出对策所需的资料。

在这个领域内，下一步的核技术发展方向应该是，建立一些能把实验室和野外数据用于环境系统的系统算法。必须开发更好的解释性和预后性模型，并且建立有关污染物在典型的地质和热力学条件下的典型迁移特性的数据库。

人们常说，在应用放射性同位素方面普遍感到不便的是，研究者申请应用放射性同位素执照时需要提供环境影响报告。这项要求往往会在公众，甚至决策者中引起误解。在大多数情况下，在水文学和水文地质学研究中使用的人造同位素，其浓度是很低的。只

要遵守公认的和大家都了解的安全预防措施，它们是不会对工作人员、公众和环境带来危害的。使用具有天然放射性的环境同位素，更不会产生任何特殊的安全问题。

为了帮助研究者和各国政府主管部门，IAEA正在编写一本关于水文学中使用的人造放射性示踪剂安全操作参考手册。

IAEA 的其它活动

IAEA 在污染迁移领域的其它活动，包括涉及地表水和地下水的同位素水文学和地球化学研究的许多项目。

此外，IAEA 还召开过若干个专家咨询组会议，审议核技术在地下水评估方面的有用性、可靠性和适用性。讨论过的具体课题有水文学方面的同位素示踪技术、地下水含水层的易损性、稀有气体和惰性气体的同位素在大气圈和水圈过程研究中的应用，以及同位素水文学方面的计算机模拟等。

有关这些课题的若干个协调研究计划（CRP）正在实施，其中一个 CRP 涉及的是建立同位素在水文地质系统中的迁移模型，另一个 CRP 涉及的是开发与评价污染物迁移研究所需的核技术。参加后一个 CRP 的有澳大利亚、巴西、法国、捷克斯洛伐克、丹麦、芬兰、德国、墨西哥、美国 and 苏联等国的科研组。

正在得到 IAEA 支助的还有拉丁美洲、中东、非洲和亚洲地区的一些有关水文学和水文地质学领域的区域性技术合作项目。IAEA 还定期举办有关同位素技术的基本方法和实践，包括那些对解决水的保护问题很有用的技术应用和方法的培训班，培训来自不同国家的专家。

1991 年 3 月，IAEA 将召开一次国际同位素水文学学术会议，会上将讨论同位素技术在地下水污染/保护研究中的应用问题。它将是 1963 年以来的第 8 次国际同位素水文学学术会议。