

IAEA BULLETIN

国际原子能机构通报

国际原子能机构旗舰出版物 | 2019年4月

在线阅读：
www.iaea.org/bulletin



水

节约每滴水：同位素水文学技术改善科威特的水管理，第9页

展望水资源的未来与气候变化的影响，第24页

城市水管理：同位素水文学的作用和开普敦水危机的教训，第29页

内容还包括：
国际原子能机构新闻



国际原子能机构（原子能机构）的使命是防止核武器扩散和帮助所有国家特别是发展中国家从核科学技术的和平、安全和可靠利用中受益。

1957年作为联合国下的一个自治机构成立的原子能机构是联合国系统内唯一拥有核技术专门知识的组织。原子能机构独特的专业实验室帮助向原子能机构成员国传播人体健康、粮食、水、工业和环境等领域的知识和专门技术。

原子能机构还作为加强核安保的全球平台。原子能机构编制了有关核安保的国际协商一致准则出版物《核安保丛书》。原子能机构的工作还侧重于协助最大限度地减少核材料和其他放射性物质落入恐怖分子和犯罪分子手中或核设施遭受恶意行为的风险。

原子能机构安全标准提供一套基本安全原则，反映就构成保护人和环境免受电离辐射有害影响所需的高安全水平达成的国际共识。这些原子能机构安全标准的制定针对服务于和平目的的各种核设施和核活动，以及减少现有辐射风险的防护行动。

原子能机构还通过其视察体系核查成员国根据《不扩散核武器条约》以及其他防扩散协定履行其将核材料和核设施仅用于和平目的的承诺情况。

原子能机构的工作具有多面性，涉及国家、地区和国际各个层面的广泛伙伴的参与。原子能机构的计划和预算通过其决策机关——由35名理事组成的理事会和由所有成员国组成的大会——的决定来制订。

原子能机构总部设在维也纳国际中心。外地和联络办事处设在日内瓦、纽约、东京和多伦多。原子能机构在摩纳哥、塞伯斯多夫和维也纳运营着科学实验室。此外，原子能机构还向设在意大利的里雅斯特的阿布杜斯·萨拉姆国际理论物理中心提供支持和资金。

《国际原子能机构通报》

主办单位

国际原子能机构新闻和宣传办公室

地址：维也纳国际中心

PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

电话：(43-1) 2600-0

电子信箱：iaebulletin@iaea.org

执行编辑：Laura Gil

编辑：Miklos Gaspar

特约编辑：Nicole Jawerth

设计制作：Ritu Kenn

《国际原子能机构通报》可通过以下网址在线获得：

www.iaea.org/bulletin

《国际原子能机构通报》所载的原子能机构资料摘录可在别处自由使用，但使用时必须注明出处。非原子能机构工作人员的作品，必须征得作者或创作单位许可方能翻印，用于评论目的的除外。

《国际原子能机构通报》任何署名文章中表达的观点不一定代表原子能机构的观点，原子能机构不对其承担责任。

封面：科威特波斯湾低潮时的海岸线

（图/国际原子能机构D. Calma）

请关注我们



了解世界水资源

文/国际原子能机构总干事天野之弥

水是地球上生命所依赖的宝贵资源。然而，我们对于我们所拥有的水资源数量、确切位置以及供应持续时间却知之甚少。在地球所有淡水中，98%被隐藏在地下。为了保护淡水免受过度提取和污染等威胁，同时为了后代可持续地管理淡水，我们必须深入研究地下水。

国际原子能机构通过推广同位素技术应用并传授科学专门知识，为从事这项工作的各国专家提供支持。使用这些技术收集的数据有助于改进水管理政策。

支持成员国管理和保护供水系统是我们“原子用于和平与发展”任务的一部分。我们鼓励各国充分利用核技术改善人民生活的各个方面并关爱环境。保护水资源是其中的一个重要方面。

本期《国际原子能机构通报》涵盖核技术在同位素水文学领域的应用以及原子能机构向成员国提供这些技术的工作。它提供了对这一科学的概述（第4页），并展示了我们的共同努力正在发挥作用的国家的国家。例如，在第6页，我们描述了阿根廷同位素水文学工作者如何为决策者收集数据，以制定全国先进水管理模式。

科威特当局在原子能机构的支持下强调了他们更加可持续用水计

划（第9页），而菲律宾研究人员阐明了他们如何证实其国家北部地下水可以安全饮用（第12页）。在第14页，我们追踪了毛里求斯污染水源，并在第16页揭示了萨赫勒半干旱地区地下隐藏的丰富水体。

本期《国际原子能机构通报》还包括一个技术部分，展示原子能机构为成员国制定的同位素水文学方法。其中包括用于确定新生水体精确年龄的氚/氡-3测定技术（第20页）和同位素水平衡模型（第24页），这可以帮助科学家预测气候变化对水资源的影响。

您可以了解同位素水文学在压裂开采过程中保护环境的作用（第22页），以及原子能机构如何测试世界各地实验室分析水的能力（第26页），而第18页介绍了原子能机构与世界气象组织合作开发的全球同位素监测网络。

今年的“同位素水文学国际专题讨论会”是此类会议的第15届，汇集了世界各地一流的水和环境专业人士，以促进对同位素水文学在帮助世界应对快速变化的全球环境方面的巨大效益的认识。

我希望本期《国际原子能机构通报》能使您深入了解核技术这一广泛而具有吸引力的应用。



“支持成员国管理和保护供水系统是我们‘原子用于和平与发展’任务的一部分。”

——国际原子能机构总干事天野之弥



（图/国际原子能机构L. Potterton）



（图/厄瓜多尔滨海理工学院）



（图/国际原子能机构L. Gil）

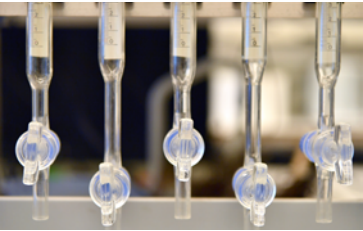
前言

- 1 了解世界水资源
- 4 同位素水文学：综述

影响力故事



6 阿根廷将同位素技术应用于水



9 节约每滴水：同位素水文学技术改善科威特的水管理



12 研究发现菲律宾城市用水可安全饮用

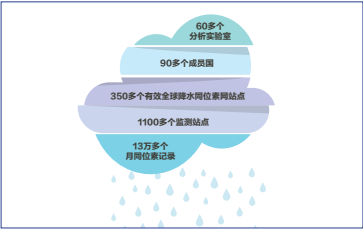


14 同位素帮助追踪毛里求斯城区水污染来源



16 利用同位素技术绘制和分析萨赫勒地区地下水资源

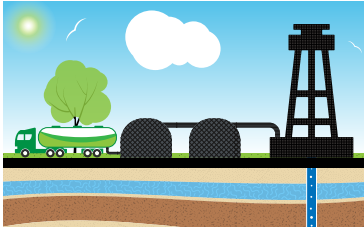
技术



18 全球降水同位素网



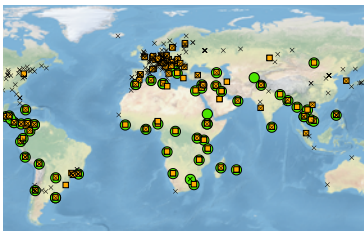
20 借助氦/氡-3技术管理水资源预算



22 水力压裂法：同位素水文学如何支持环境评估以帮助保护地下水



24 展望水资源的未来与气候变化的影响



26 取得好成绩
国际原子能机构测试实验室分析水的能力

世界观点

29 城市水管理：同位素水文学的作用和开普敦水危机的教训
文/Jodie Miller

31 同位素测绘地下水污染和更新
文/ Joel Podgorski、Michael Berg 和Rolf Kipfer

国际原子能机构最新动态

33 新的保障工具加强了国际原子能机构对乏核燃料的核查

33 在乌兹别克斯坦举办的国际原子能机构讲习班重点关注核电厂选址和场址评价

34 核技术如何助力中国农业发展

同位素水文学：综述

文/Lucía Ortega和Laura Gil



同位素技术让科学家能够了解水循环的构成，帮助他们更好地评价水量、水质和水的可持续性。

在水循环方面，人们了解最少的是地下水。科学家利用天然存在的放射性同位素作为示踪剂来查明地下水是否在得到补给、从何而来、在地下如何运动、是否容易受到污染和不断变化的气候状况的影响。

不同地方的水具有不同的同位素特征或独特的“指纹”。科学家利用这些“指纹”追踪整个水循环过程中水在流经路径上的运动：从蒸发、沉淀、渗透到径流和蒸腾，然后回到海洋或大气，如此往复。

然而，什么是同位素？

化学元素（如氢）完全由一种原子构成，而同一种原子的种类各有不同，这些不同种类的原子就是同位素，它们具有相同的化学特性，有相同数量的质子和电子，但中子数不同。中子数的差别使得每种同位素的重量不同，而此重量差别就是水文研究的关键。

同位素水文学既使用稳定同位素，也使用不稳定同位素。稳定同位素具有非放射性，也就是说它们不发出辐射。不稳定同位素（亦称为放射性同位素）经历放射性衰变，因此具有放射性。

下面简述同位素水文学科学是如何工作的。

水循环中水的来源和输运

每一个水分子（ H_2O ）都是由两个氢（H）原子和一个氧（O）原子组成，但它们并非完全相同：有些原子的同位素较轻，有些则较重。科学家们使用精确的分析设备测量水样品中这些微小的重量差异。为什么呢？

在海水蒸发过程中，具有较轻同位素的分子往往优先上升，形成具有特定同位素特征的云。这些云层混合了水分子，水分子以雨的形式降落。具有较重同位素的水分子最先落下。随后，云失去这些较重同位素，并进一步向内陆移动，较轻同位素以更大比例落下。

水落到地上，充满湖泊、河流和含水层。通过测量这些水体中重同位素与轻同位素的比率，科学家可以破译水的来源和运动。

地下水年龄

同位素是估算水资源年龄、脆弱性和可持续性的最直接和最有力的工具。含水层中的地下水“年老”，意味着水流缓慢，且含水层需要很长时间才能得到补给。相反，“年轻”地下水很容易迅速得到雨水更新，但也很容易受到污染和不断变化的气候状况的影响。了解水的年龄使科学家和政府能



够很好地掌握含水层的补给率。

在水文学中，存在于水中的一些天然存在的放射性同位素，如氚（ ^3H ）、碳-14（ ^{14}C ）和惰性气体放射性同位素，被用于估算地下水年龄。此年龄可能从数月到数百万年不等。

这些同位素随着时间衰减，其丰度也逐年减少。较高的值意味着水“较年轻”，而较低的值意味着水“较年老”。例如，可检测到氚含量的地下水可能有60年左右的历史，而不含氚的地下水则必然更古老。氚用于测定新近补给的地下水，即小于60年的地下水，而碳-14用于测定4万年以上的水，氦-81用于测定百万年以上的水（见第21页）。

水质

地表水和地下水中的污染物来源多种多样，如农业、工业和人类排泄物，也可能由于含水层中发生的地球

化学过程而自然存在。农业、工业和家庭产生的污染物种类各不相同。通过研究污染物的化学和同位素组成，科学家可以确定其来源。

例如，由氮和氧形成的硝酸根离子（ NO_3 ）是一种常见的污染物。氮有两种不同重量的稳定同位素。人类排泄物和肥料中氮的重量差别是不同的。肥料用的是空气中的氮，而人类和动物则经过一个生物过程将氮转化为不同的形式。因此，可以根据这些同位素的重量差别来识别不同来源的污染物。

了解污染物的来源是解决水质问题的第一步。同位素水文学家收集的数据对决策者的战略研究很有帮助。

原子能机构通过促进同位素技术应用，将科学专门技术传授给当地水专业人员，为世界各地的科学家提供支持。要进一步了解我们如何做到这一点，请继续阅读。

阿根廷将同位素技术应用于水

文/Laura Gil

像 在世界许多地方一样，在阿根廷，水有被过度开采和污染的危险。为了保护水，科学家们借助核技术，在国际原子能机构的支持下正在研究水不为人知的细节。

“阿根廷很幸运，每个居民都拥有大量的水，但是水在全国分布非常不均匀，” 阿根廷国家原子能委员会环境管理人员Daniel Cicerone说。“在有些地区，查明我们每天使用的水是否

得到定期补给、耗尽或面临污染的风险，能够让生活有贫穷与繁荣之别。”

其背后的科学被称为同位素水文学，根据美国犹他大学地质学和地球物理学教授Douglas Kip Solomon的说法，这一学科“是全面评估地下水最有力和最值得信赖的工具之一。”

“世界上大多数可以利用的淡水都在地下，但我们能得到的大部分水却是地表水，” 在国际原子能机构的协助



“阿根廷很幸运，每个居民都拥有大量的水，但是水在全国分布非常不均匀。在有些地区，查明我们每天使用的水是否得到定期补给、耗尽或面临污染的风险，能够让生活有贫穷与繁荣之别。”

—阿根廷国家原子能委员会环境经理Daniel Cicerone

下，正在帮助阿根廷专家绘制水分布图的Solomon说。“了解地表水和地下水之间的相互作用极其重要，这样我们就知道如何正确管理和保护这些资源。”

隐性储藏

自2016年初以来，在国际原子能机构的帮助下，阿根廷同位素水文学家一直在收集和解读两个战略地区的数据，目的是让决策者利用这些信息，为这些地区设计先进水管理模式——水文模型。

选择这两个地区的原因有所不

同。第一个地区是阿根廷西部门多萨干旱河谷，那里的人们依赖Uspallata和Yaguaráz两个含水层以及其他一些较小含水层的地下淡水。当局急于查明这些水是否在可持续地开采，以及含水层是否有足够的容量支持增加的用水。

“我们每件事都需要水。水是我们的每日食粮，”在Uspallata地区一座山顶上的一家皮划艇和漂流探险商店工作的Sergio Cirauqui说。“但是我们非常清楚水是一种有限的资源，我们必须谨慎对待。作为一种有限的资源，我们应该几乎神圣地使用它。”

阿根廷同位素水文学家在国际

在阿根廷门多萨地区，科学家利用同位素水文学研究地下水。

(图/国际原子能机构L. Gil)





同位素水文学家从阿根廷西部门多萨地区采集水样。
(图/国际原子能机构L. Gil)

专家和原子能机构专家的陪同下，在门多萨山区和平原上徒步旅行了一年多，从井、湖泊和河流中收集水。他们回到实验室对这些结果进行解读，以更清楚地描绘现有情况。

正在参加原子能机构在该国的一个技术合作项目的门多萨库约大学同位素水文学家Sandra Ibáñez说：“我们希望弄清楚水在含水层中如何运动，如何与河流相互作用，以及还剩下多少。”

基于这些数据，决策者会更好制定饮用、农业和工业方面的用水规则。例如，知道地表水正在渗入地下水，就可能提出对可接受污染水平的更严格规定。

“一旦获得这些结果，我们就可以决定在门多萨地区开展哪些业务活动，”门多萨省灌溉总部地下水部门副主任Juan Andrés Pina说。

正在研究的第二个地区是科尔多瓦省Los Gigantes地区的一条河床，即

布宜诺斯艾利斯以西约700公里处一个旧铀矿开采综合体。该场址正在接受环境整治，同位素水文学家正在努力查明更多有关地下水质量及其可能受污染影响情况。

通过这个原子能机构项目，科学家们对圣罗克湖水库补给用水的安全和质量进行了监测，该水库是科尔多瓦市人的饮水之源。

“这项跨学科和跨机构的研究将有助于当局改善该地区的概念模型和水文了解，并加强对该场址的整治，”国家科学技术研究委员会地质学家、研究员Daniel Martínez说。

原子能机构技术合作司科长Raúl Ramírez García说，原子能机构技术合作项目对于向国家和地方机构传授知识和技术至关重要。

“同位素技术提供的新信息将有助于监测水资源，并支持将为这些地区的人口带来社会经济效益的决策，”Ramírez García说。

节约每滴水：同位素水文学技术改善科威特的水管理

文/Aabha Dixit

像科威特这样的干旱国家越来越关注使用稳定同位素的技术，以评估地下水资源，并以可持续方式管理这些资源，应对其不断增长的人口挑战。

“科威特没有永久性河流或湖泊，地下水是我们唯一的天然水资源。我

们的年平均降雨量仅为115毫米，连淡水小溪都没有，”科威特科学研究所水研究中心执行主任Muhammad Al Rashed说。因此，有效的水管理政策对于确保可用水的质量和数量以满足该国400多万人口的需求至关重要。

科威特科学研究所的一位科学家用培养箱制备细菌分析水样。同位素技术是研究水质的关键。

（图/国际原子能机构 D. Calma）



“我们必须研究所有可用的饮用水地区，这也是同位素技术有助于调查的地方，因为它着眼于可持续发展所需的所有水资源的最佳利用。”

—科威特科学研究所水研究中心业务部主任Khaled Hadi

科威特的地下水储量主要集中在该国北部，且补给量有限，因为只有很小比例的雨水流入这些含水层。

同位素水文学技术是科威特专家用来追踪淡水运动和评估可用地下水年龄的重要科学方法之一。水中携带的各种同位素作为“标签”，可用于确定地表水和地下水的来源、年龄、运动和相互作用（请参见第4页了解更多信息）。所获得的并以水文图形式显示的数据，使专家能够就可持续资源管理做出循证决策。Al-Rashed和他的同事为科威特地下水管理进行了几项同位素水文学研究。

科威特的用水量在世界最大，人均日耗水量超过400升。在科威特，地下水的提取速率为每年2.55亿立方米。相比之下，含水层的天然地下流量估计为每年6700万立方米。由于淡水资源有限，科威特严重依赖海水淡化，这是一种昂贵的水生产法。

科威特科学研究所水研究中心业务部主任Khaled Hadi说：“我们必须研究所有可用的饮用水地区，这也是同位素技术有助于调查的地方，因为它着眼于可持续发展所需的所有水资源的最佳利用。”

科威特科学研究所国际合作执行专员Nader al-Awadi说，国家工作的重点是结合物理化学方法利用同位素水文学调查地下水资源，评价降水补给，制定最佳水生产战略，以及评价含水层人工补给的可行性。

与水有关的研究，实验室支持

自2000年以来，原子能机构一

直通过各种技术合作项目支持科威特，获得了对可用地下水资源的了解，并为加强水管理政策制定了纠正行动。

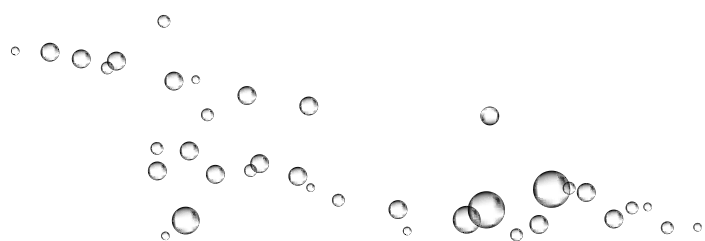
例如，一个原子能机构支持的同位素调查技术合作项目旨在评价科威特的地下水水文学，重点是收集地下水的同位素数据，然后将这些数据与以前研究期间收集的数据结合起来，以获得覆盖全国地下水的同位素图。同位素技术的应用有助于解释地下水的来源、年龄和运动，这对水资源的可持续管理至关重要。

另一个项目侧重于通过同位素表征评价科威特地下水域中硝酸盐和硫酸盐的潜在污染源，包括研究地下水中天然存在的放射性物质含量。研究人员发现，地下水中硫酸盐和硝酸盐的主要来源是天然的，而不是人类活动的结果。

一些水样被送往奥地利维也纳的原子能机构同位素水文学实验室进行评价。

原子能机构还支持利用通过原子能机构技术合作项目提供的最先进仪器建立科威特同位素水文学实验室。能力建设援助的其他领域包括培训科学家和对一系列地下水问题进行研究。

“科威特政府高度重视原子能机构通过其在促进全球能力建设、网络建设、知识共享和伙伴关系发展中对成员国提供的活动和支持，在和平利用核科学技术的各个方面所发挥的重要作用，”科威特科学研究所所长Samira A.S. Omar说。



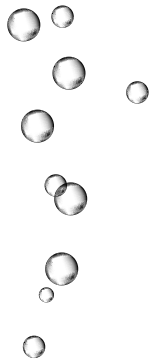
研究发现菲律宾城市用水可安全饮用

文/Miklos Gaspar



同位素技术已经证实，这些男孩后面的贮水池里和塔克洛班新社区里的城市用水可以安全饮用。

(图/国际原子能机构 M. Gaspar)



菲律宾有25万人口的塔克洛班市的饮用水是安全的，得到定期补给，且不受海水威胁。听起来很简单，是吧？这一结论花费了多年研究，经过对成千上万份水样的分析才得出，并且需要菲律宾核研究所研究人员在国际原子能机构和联合国粮食及农业组织（粮农组织）的支持下使用同位素技术完成。

2013年，有记载以来威力最强的热带风暴之一台风“海燕”引发的风暴潮摧毁了这个城市大部分地区，造成数千人死亡，地方当局面临重建的艰巨任务，包括将人们从最易受洪水侵袭的地区转移出去。但是，卷走建筑物和人员的海浪是否已进入城市水库？

有一种危险，那就是风暴潮可能污染了这个城市的主要水源——含地下水的地下渗透性岩石层（含水层）。盐和洪水产生的其他污染物，包括动物和人类尸体中的有机物，可能已经使水不适合饮用。菲律宾核研究所求助国际原子能机构技术合作计划协助用同位素技术表征含水层。

并非所有水分子天生都一样

虽然所有水分子都是由一个氧原子和两个氢原子组成，但这些原子中的一小部分在原子核中有多余的中子。具体比例取决于水的年龄和来源。因此，通过对地下水同位素组成进行分析，研究人员可以发现含水层是否正在得到补给，也就是说，从雨水中定期接受一定量的“新”水。

科学家们建立了32个地下水监测站，并利用常规技术和核技术对水进行表征。他们几乎没有发现钠和氯化物，因此得出结论，海水没有进入含水层。他们还发现，含水层中水的同位素组分接近当前雨水的同位素组分，这意味着城市的供水没有消失的危险，领导该项目的菲律宾核研究所高级研究员Raymond Sucgang解释说。他说：“塔克洛班是一个经济不断增长的城市，因此获悉其地下水正在得到雨水补给令人欣慰。”

当时水中氮和有机物的浓度很低，说明没有生物污染。“这些潜在的污染物可能在进入地下水之前就腐烂掉了，” Sucgang说。

该项目的下一步是由菲律宾核研究所确定准确的水补给率，并在此基础上向当地政府提出保护城市供水的政策建议。Sucgang说：“很高兴得知当前没有危险，但仍然需要制定可持续用水政策。”

寻找地下饮用水

近几年来，塔克洛班城市北部出现了一个新区，在2013年台风中失去家园的许多人都在这里安居下来。在

这个成为1万人的家园的新区，水的可用性是一个问题，而菲律宾核研究所的研究表明，这个新居住区的地下水被铅和砷污染，因此不适合人类饮用。Sucgang说，污染可能来自这个小区边缘地带缺乏监管的垃圾填埋场。

对于当地居民和社区领导Eddie Rasonabe来说，这是一个灾难性的消息。“我们现在得知不能依靠水井，现在就得付费取水。”最初在国际援助机构的帮助下安装的手摇泵只能抽

出浅层含水层的水，此水散发出恶臭，Rasonabe说。结果，他被迫购买矿泉水来饮用和烹饪——对这位有七个孩子的父亲和他的许多邻居来说这是一笔不菲的开支。但是眼下有一个解决方案：当地政府已经与私营公司签订合同，从这个城市未污染的含水层中抽取饮用水，菲律宾核研究所正在使用同位素监测从这些深井抽取的地下水是否满足质量要求，并确保开采速率的可持续性。

“很高兴得知当前没有危险，但仍然需要制定可持续用水政策。”

—菲律宾核研究所高级研究员
Raymond Sucgang

Eddie Rasonabe不能饮用他家井里之水，因为菲律宾核研究所的研究表明该水井铅和砷含量高。该社区的建立，为2013年因台风“海燕”失去家园的居民提供了安身之地。

（图 / 国际原子能机构 M. Gaspar）



同位素帮助追踪毛里求斯城区水污染源

文/Luciana Viegas

根 据国际原子能机构支持的一项利用同位素技术进行的研究的初步结果，农业活动、非法污水处理和动物饲养都可能是毛里求斯首都路易斯港周围城市河道的氮污染源。诸如硝酸盐等一些氮化合物如果过量，就会进入城市河道，对人类和环境造成危害。

“硝酸盐污染是该国关切的一个主要问题，”位于这个拥有约20万人口岛国的最大城市和经济中心路易斯港的国家环境实验室科学官员Yannick Fanny说。“这项研究是一项突破，初步结果表明硝酸盐污染最有可能来源于粪便和化粪池废物，以及土壤中溶解的有机物。”

氮是一种重要肥料，自20世纪中期以来得到了广泛应用。氮肥过量施用，可以通过农业径流进入河流和地下水，也可以通过污水系统、动物饲养场和工业活动进入河流和地下水。

硝酸盐是一种氮化合物，也是植物必需的营养物质。过量的硝酸盐会损害全身血液输送氧气的的能力，从而对公众健康造成威胁。它还可能导致湖泊和河流中出现藻华，减少生物多样性，降低水生生态系统支持旅游和商业捕鱼等宝贵服务的能力。

2016年，在当局检测到路易斯港周围的硝酸盐污染后，科学家开始与国际原子能机构合作，使用同位素技术评估硝酸盐污染的来源。在溪水和河流中发现了污染物，这威胁到诸如红河河口鸟类保护区等保护区。海洋

中有毒藻华导致了鱼类死亡事件，引起了当地渔民的抱怨。

这种污染的来源可能是多种多样的：来自家庭的不适当的废水处置系统、有缺陷的化粪池、工业排放、动物饲养和农业活动。了解是谁或是什么造成了硝酸盐污染，可以帮助决策者采取明智的行动，以保护河流和地下水。

破解水道中硝酸盐的来源会很困难。“传统化学会告诉你河流中有多少氮污染，但不会告诉你这些污染来自哪里，”国际原子能机构同位素水文学家Ioannis Matiatos说。“分析硝酸盐的同位素可以提供这种信息。”

在技术援助下，国家环境实验室的科学家们在城市周围14个河流站和15个水井中收集了化学和同位素数据，并确定了影响该地区水质的机制。他们在国际原子能机构技术合作计划的支持下，以专家访问、培训和设备的形式，对路易斯港水道中的氮化合物进行取样和分析。他们使用的方法包括通过研究水分子的同位素组分分析水分子中硝酸盐的独特“指纹”（阅览第5页了解更多内容）。

采取行动

这项原子能机构技术合作项目的成果将构成一份综合报告的基础，不仅为政府官员，也为当地社区提供调查结果和建议。“所有有关利益相关者的有针对性的行动方案可以帮助迅速补救或改善这些城市的环境状况，”Fanny说。

“传统化学会告诉你河流中有多少氮污染，但不会告诉你这些污染来自哪里。分析硝酸盐的同位素可以提供这种信息。”

—国际原子能机构同位素水文学家Ioannis Matiatos



同位素水文学家从路易斯港附近的一个污染点采集水样。
(图/国际原子能机构I. Matiatos)

该合作还为整个毛里求斯增加的水监测活动奠定了基础。国家环境实验室的科学家们已经开始绘制对水道中氮污染贡献最大的区域图，并正在收集水污染材料样品，以编制一份同

位素特征清单，用于识别污染物。

“如果将来发生事故，当局可以迅速将水样与污染源进行匹配，可立刻知道可能是哪种活动造成的，”Matiatos说。

利用同位素技术绘制和分析萨赫勒地区地下水资源

文/ Nathalie Mikhailova

“一般来说，位于不同共享流域的含水层系统往往大量储备着优质水，可以满足大多数的人类需求。”

—突尼斯斯法克斯国家工程学院教授、实验室主任Kamel Zouari

虽然在过去几十年里发生了一系列的干旱，降雨量一直很低，但萨赫勒地区仍是隐藏着丰富的地下水体的家园。

人口增长导致的水需求增加以及气候变化和土地利用对水资源造成的不确定性，引发了如何确保用于饮用、食品生产和卫生的清洁水的安全和充分供应问题。对于像萨赫勒这样的半干旱地区，拥有找到更多地下水供应的正确科学工具可能意味着可长期获得清洁的水。

通过2012年开始的一个国际原子能机构技术合作项目，阿尔及利亚、贝宁、布基纳法索、喀麦隆、中非共和国、乍得、加纳、马里、毛里塔尼亚、尼日尔、尼日利亚、塞内加尔和多哥的科学家接受了水取样和同位素分析的培训，以便对地下水供应进行详细调查。该项目覆盖了该地区五个主要跨界含水层系统的区域：伊莱梅登含水层系统、利普塔科-古尔马-上沃尔塔系统、塞内加尔-毛里塔尼亚盆地、乍得湖盆地和陶德利盆地。

历时四年，在旱季和雨季，从不同含水层采集了2000多个水样。

“通过使用同位素和化学示踪剂，科学家能够收集有关地下水来源、流动型式、停留时间和更新速率的重要信息，”从事该项目的突尼斯斯法克斯国家工程学院教授、实验室主任Kamel Zouari说。“科学家还确定了浅层和深层含水层之间以及含水层和地表水之

间的水力相互作用。这些信息已编入每个流域的专用数据库中。”要了解更多有关所用技术的情况，请参见第4页。

这些研究活动形成了对萨赫勒地区覆盖面积达500万平方公里的地下水的首次全面概述。“一般来说，位于不同共享流域的含水层系统往往大量储备着优质水，可以满足大多数的人类需求，” Zouari说。

利用数据制定水管理办法

每个国家的科学家提出了国家报告，供其水资源管理部门作为决策的基础。例如，在加纳北部，地下水化学和同位素组分的常规监测揭示了以前被忽视的补给机制和污染源。

加纳水资源委员会地下水部门负责人Enoch Asare说：“通过使用水的稳定同位素（氧-18和氢-2），我们发现地下水与大气有关，这意味着它的来源是局部降水。”他说，氦分析显示，地下水在过去50年一直为含水层补给水。“氮-15被用来确定白沃尔特河流域部分地区的硝酸盐污染源，表明污染主要来自人畜废物。”判定污染源有助于当局保护水源，因为它揭示了地下水正在如何得到补给，这是确保地下水可持续性的关键。

地下水能否满足人类需求取决于其数量、质量和补给率。为了正确评估其可持续性，特别是考虑到现有或计划的抽水活动，需要提供有关地下



水来源和年龄的信息。

“预计该项目的活动将进一步增强利益相关者更好地了解加纳水文地质系统的能力，从而制定政策，保护地下水资源的开采，确保随时有水可用，” Asare说。

2018年开始了一个进一步整合萨赫勒地区国家地下水资源管理的后续项目。它将采用由贝宁、喀麦隆、加纳、尼日尔和尼日利亚牵头的“原子

能机构加强水供应项目”的方法，以确定国家水文信息的差距，制定适当的能力建设计划。

“原子能机构加强水供应项目”方法包括差距分析和利益相关者协商、制定地下水管理最佳策略以及确定要投入的基本技术能力。

已建立的国家机构网络将有助于利用同位素水文学和常规技术更好地表征、管理和监测地下水资源。

班吉大学研究人员从中非共和国的一口井里提取水样。
(图/国际原子能机构L. Gil)





全球降水同位素网

自 1961年以来，国际原子能机构和世界气象组织一直在联合开展降水中氢（ ^2H 、 ^3H ）和氧（ ^{18}O ）同位素的全球调查。

此同位素监测网络被称为“全球降水同位素网（GNIP）”。最初目标是在全球范围内系统地收集降水中同位素含量的基本数据，以确定降水中环境同位素的时空变化。有了这些信息，科学家们可以弄清水的来源、运动和历史。为了支持这项工作，国际原子能机构建立了同位素水文学实验室。

通过这个设施，基本同位素数据开始用于水文调查。从20世纪90年代起，全世界的研究人员和从业人员都可以在线获取这些数据。它们现在被用来研究水资源，也用来解释过去的气候档案和动物迁徙。

全球降水同位素网目前在90多个国家和地区拥有350多个有效采样站点。虽然原子能机构同位素水文学实验室在分析通过全球降水同位素网收集的降水样品方面仍然发挥着关键

作用，但60多个实验室（其中一些实验室是通过原子能机构技术合作项目建立的）都在为这一分析工作贡献力量。

国际原子能机构维护着全球降水同位素网的中心数据库，该数据库载有来自一千多个站点的13万多个降水同位素记录。原子能机构还积极参与研究和开发，帮助科学家收集降水样品。例如，它开发了一种蒸发安全降水取样器，该取样器可靠、易于使用，且要求的实验室预处理工作较少。

全球降水同位素网数据库中的历史和当前数据被用于验证和进一步改进气候预测模型（见第24页）以及其他应用。

要了解更多信息，请尝试访问：
h2o.iaea.org。



全球降水 同位素网 各种数字

60多个
分析实验室

90多个成员国

350多个有效全球降水同位素网站点

1100多个监测站点

13万多个
月同位素记录

借助氚/氦-3技术管理水资源预算

文/Nicole Jawerth

管理水就像管理您银行账户的资金一样：您需要确切知道有多少钱进入，有多少可以取出，以及可能导致变化的原因。错误估计可能会产生严重的、可能持久的后果。在水世界中，这可能意味着水短缺或者水资源被污染、无法使用。

为了建立可靠的水资源预算，关键因素之一是了解水的确切年龄。对于更容易受当前气候条件和污染影响的新生水，科学家们使用氚/氦-3技术。通过这项技术和其他技术，来自23个国家的科学家正在与原子能机构合作收集有关水资源的数据。

“水的年龄可以说明它最可能的来源、补给速度以及被污染的可能性，”摩洛哥国家核能、科学和技术中心科学主任Hamid Marah说。“利用氚/氦-3技术，我们可以知道水是1年、5年还是25年，而不仅仅认为它是新生、古老，或两者兼而有之。”

水的年龄可以从几个月到几百万年不等。例如，如果水是一年，这意

味着它需要一年的时间来补充，更有可能受到当前气候条件和污染物的影响。如果水已有5万年的历史，则需要5万年的时间进行补充，并且不太可能受到当前气候变化的污染或影响。

几乎所有世界上可用的淡水供应都存在于含水层中，含水层是地球表面下的多孔渗透性岩层。它们含有的水被称为地下水。随着地下水的补给或补充，它最终流入大海或自然地流入地球表面，如河流、泉水和湖泊。

“对地下水的需求不断增长，加上农业、气候变化和人类活动的影响，使可持续性变得更加重要，” Marah说。“从含水层过多地提取水，水位会下降，这可能是灾难性的。我们谈的不是从现在起10到20年：它的影响持续几代。”

氚/氦-3技术是研究新生水即60年以下的水（见第21页“科学”栏）的最常用技术之一。从这些研究中收集的数据可以帮助决策者制定更有针对性和可持续性的水资源管理战略和政策。

“利用核技术进行水资源研究正在打破范式并改变我们对控制水文过程的关键驱动因素的传统理解，”哥斯达黎加国立大学同位素水文学家兼副教授Ricardo Sánchez-Murillo说。“例如，在哥斯达黎加，使用同位素技术获得的结果正在为制订水管理计划和决定提供输入，帮助该国在2030年前实现联合国有关水问题的“可持续发展目标6”。

更准确的预算

在过去十年中，氚/氦-3技术已成为一种越来越重要的技术，之前仅使

科学家利用同位素技术研究摩洛哥北部泉水的年龄和来源。

（图/摩洛哥国家核能、科学和技术中心）



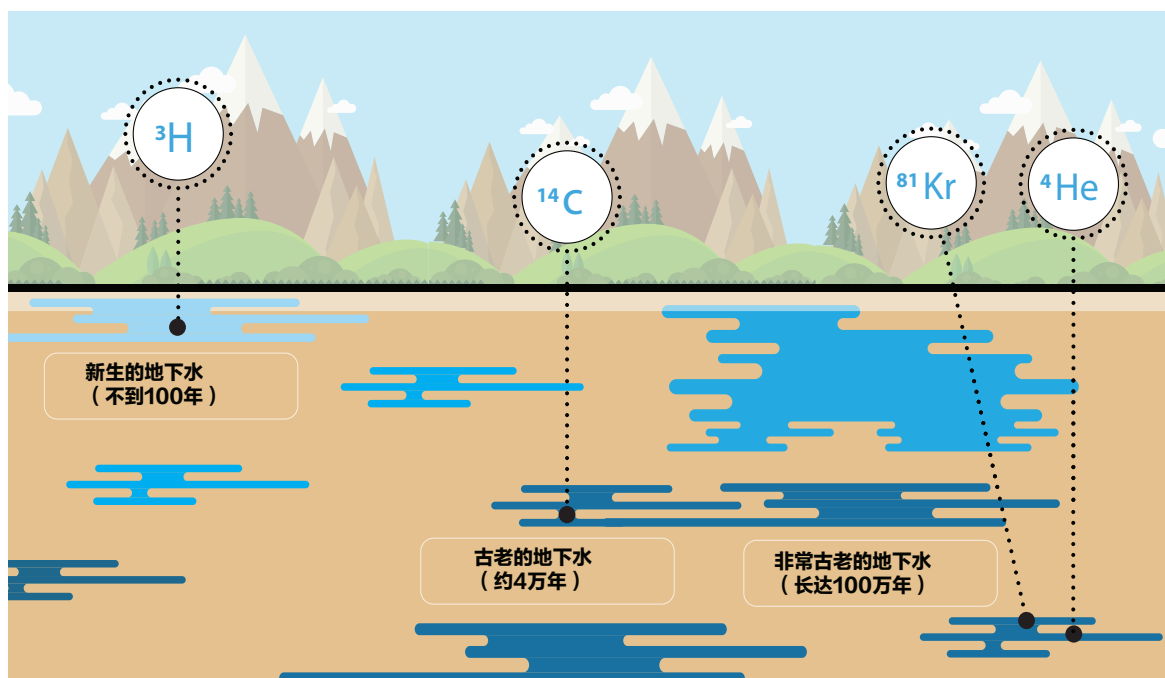
用氚的方法变得越来越不实用。

“氚可以告诉我们地下水的年龄以及它是否正在得到补给，这是非常重要的信息，但单靠氚无法为我们提供所需的详细程度。决策者需要了解更多：水新生意味着什么？多少年算新生？” Marah说。由于20世纪50年代热核装置的大气试验，大气中氚的含量在20世纪60年代急剧增加，此后逐渐下降。“从20世纪60年代到

90年代，氚是一种良好的示踪剂，但目前大气中的氚含量较少，因为它已经衰变成氦-3，因此我们现在更多地关注氚与氦-3的比率，这更确切。”

氦是一种惰性气体，也就是说它是稳定的，不会与岩石或水中的其他元素发生化学反应。这使其成为一致且可靠的参考点。通过了解氚衰变后产生的氦即氦-3与水中氦总量的比率，以及其他惰性气体的浓度，科学家们可以确定新生水的确切年龄。

“惰性气体在水研究方面的应用不断增加，因为现在分析装置的改进足以检测出进入的极少量这些气体，”原子能机构同位素分析师Takuya



Matsumoto说，“但是，对于许多国家来说，建立自己的实验室进行这些分析是不经济或不可行的。原子能机构同位素水文学实验室向各国提供这项服务，使他们能够从这种复杂的技术中受益。”

原子能机构同位素水文学实验室是世界上少数几个能够进行这些分析的实验室之一。从2010年开始，原子能机构的一个小组和来自10个国家的外部专家花了6年的时间来建立、校准和测试原子能机构的质谱仪以及用于分析结果的数学模型。他们还制定了使用氚/氦-3技术的导则。从那时起，该实验室一直在全天候处理来自世界各国的样品，每年达300到400个。

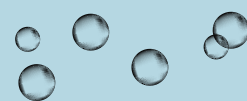
存在于水中的天然存在的放射性同位素（例如氚（ ^3H ）和碳-14（ ^{14}C ））以及溶解于水中的惰性气体同位素（例如氪-81（ ^{81}Kr ））可用于估计地下水年龄。

（图片来源：国际原子能机构）

科学

氚是氢的三种同位素之一。作为放射性同位素，氚在一定时间内衰变并转变为氦-3稳定同位素，从而不会衰变。科学家们知道，水中一半的氚原子衰变成氦-3需要12年左右的时间。

科学家使用一种称为质谱仪的专用设备按重量对同位素进行分类并确定其浓度。通过了解这些浓度以及氚衰变成氦-3所需的时间，科学家们可以追踪并确定水的年龄和补给频率。



水力压裂法：同位素水文学如何支持环境评估以帮助保护地下水

文/ Miklos Gaspar

从原则上说，水源保护区附近的任何工业活动都可能造成污染。同位素水文学为监测水质和追踪污染源（如果有的话）提供了一种独特的方法组合。越来越多的国家正在利用这项技术，通过一种称为水力压裂法的方法保护用于采油场地附近的地表水和地下水。

水力压裂法开辟了以前难以获取的石油和天然气生产资源。这种资源约占美国石油输出总量的一半，许多发展中国家正在考虑首次使用这种方法。

水力压裂法是一种良好的刺激技术，通过在高压下注入流体使岩石破裂。这种流体由水、沙子和其他化学添加剂组成。水力压裂法通过井注入流体，在深部岩层中产生裂缝，从而使天然气和石油可以通过这些裂缝更自由地流动。此方法可以获取夹在紧密岩层并且使用传统钻孔和泵送方法无法获取的石油和天然气。

地表水会因压裂过程的溢出而被污染，也可能因提取后回收压裂液的废物坑发生意外释放而被污染；如果流体通过例如废弃或泄漏的井逸出，地下水就会受到污染；如果天然气泄漏到浅层含水层，饮用水也可能被污染。

美国亚利桑那大学水文学与大气科学教授Jennifer McIntosh说，在许多疑似污染的情况下，由于缺乏基线数据，难以确定污染的来源和程度。“科学界有机会就评估逸散性气体泄漏和压裂液或地下水污染的最佳分析方法提供导则，”她说。

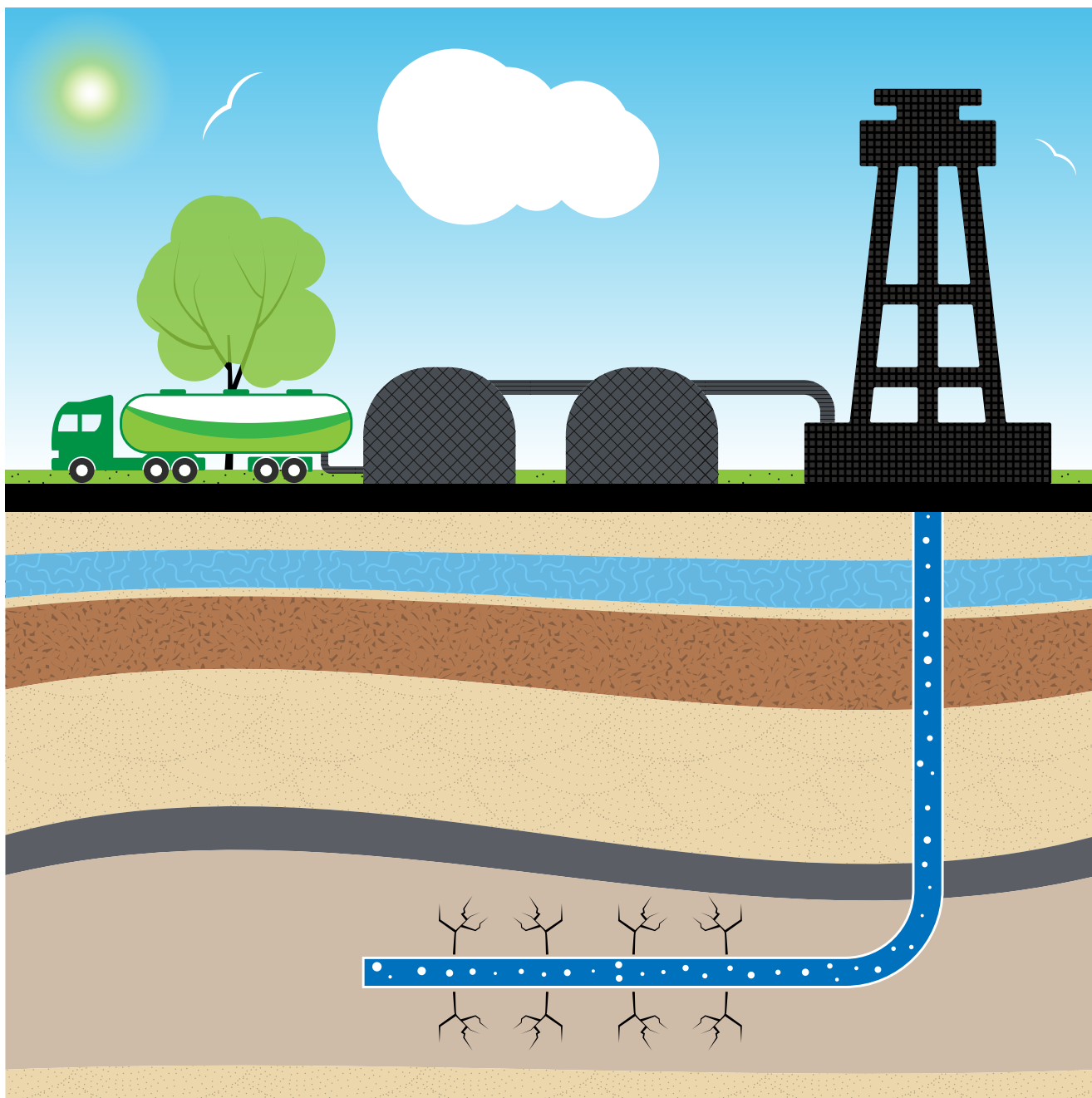
同位素水文学如何提供帮助

McIntosh和来自世界顶尖大学的14位其他作者最近发表的一篇论文解释了各种同位素水文学技术如何用于监测水力压裂法对地下水和地表水的影响，并就在各种情况和环境条件下使用哪种方法提出了建议。这篇题为“评含水层中压裂衍生气体和相关污染物识别的最新技术和新方法”的论文在2018年12月见于《环境科学与技术》期刊，其最初想法是在两年前的一次国际原子能机构技术会议上提出的。

最近在碳氢化合物、高分辨率天然气数据集和从地面到目标储层的相关流体中使用天然存在的同位素示踪剂的分析发展，以及将惰性气体地球化学和微生物学纳入更传统的水文地质和地球化学方法，为识别污染流体的来源提供了强有力的分析工具。

天然存在的放射性物质或盐等物质可以天然存在于地下水中，但也可能是污染的结果。同位素水文学可用于区分这些来源，来源的同位素组成取决于其源头：测量微量元素浓度、水的稳定同位素和溶解组分以及碘、氦和铀的放射性同位素，可以提供有关水的源头及其溶解组分的数据。除了传统的离子化学分析外，这可以揭示水的源头以及它所含的物质是压裂、其他人类活动的结果还是天然存在于环境中。

理想情况下，在压裂开始之前，应对该地区的地下水和地表水进行本底同位素调查，以确定该地区水体的



钻前特征。McIntosh解释说，然后可以对照这一基线对怀疑由压裂活动造成的污染进行同位素检测。

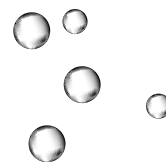
利用甲烷气体的“聚集同位素”的一种新兴的复杂同位素方法，使科学家能够探测甲烷气体中氢同位素相对于其单个碳原子的分子位置，对可疑的杂散气体可能来自哪个气藏给出新的诊断见解，并区分甲烷是来自深层热源还是由土壤细菌在含水层中自然产生的，还是上述混合原因造成的。“如氦-81和氩同位素等新的地下

水年龄放射性示踪剂可以帮助确定与水力压裂及石油和天然气生产有关的污染物可能存在于饮用水含水层中的时间，”McIntosh说。

论文最后一部分提供了分阶段识别污染计划的指南，并提供了一个战略路线图，使监管官员能够在特定场址的情况下选择最佳的同位素水文方法。

McIntosh补充说，开发用于检测压裂中污染的一些方法具有更广泛的应用，包括用于二氧化碳地下储存和核废物处置。

水力压裂法是一种良好的刺激技术，通过在高压下注入流体使岩石破裂，以获取石油和天然气。同位素水文学家可以监测水质并追踪污染源（如果有的话）。



展望水资源的未来与气候变化的影响

文/Nicole Jawerth

气候变化将如何影响一百年后的供水？为回答这样的问题，水科学家使用科学模型，其中包括原子能机构的同位素水平衡模型。该模型可以帮助专家准确可靠地预测气候变化对未来水资源的影响。他们收集的信息可以支持决策者为后代制定可持续用水政策。

模型利用现有的数据，研究和了解难以直接观察的想法、对象和过程。这包括做出预测，例如预测下周的天气状况或估计未来五年的失业率。虽然模型呈现的是一个更通用和简化的现实世界版本，但模型的每个方面经过校准，都能准确反映现实世界的运作。

水平衡模型从降水量、蒸散量、水流和蓄水量变化等方面描述水循环。与许多传统的水平衡模型不同，国际原子能机构的模型使用同位素进行模型校准并验证其准确性，因为同位素在行为上是独特和一致的（见第4页）。利用经过良好校准和验证的水平衡模型，科学家可以准确估计未来状况，例如气候变化对100年或更长时间后水资源的影响。

精确的长期预测

埃塞俄比亚的斯亚贝巴大学副教授Dessie Nedaw Habtemariam说，对于任何国家和气候来说，这些长期水研究的精确性很重要，因为高估或低估未来供水都可能产生不利影响。

“例如，如果我们错误地估计水的补给率，且我们的估计值过高，然后

将这些结果传达给决策者，那么他们就可能实施导致地下水开采速度超过其可补给速度的政策，” Habtemariam说。“这将导致可用地下水供应急剧下降，可能意味着钻井被废弃，甚至可能导致饮用水短缺。”地下水，即地表下渗透性岩石层中的水，是埃塞俄比亚大多数人口的主要淡水来源。

另一方面，低估水的补给率可能导致不必要的严格用水政策或影响发展决策，例如由于水资源缺乏而阻碍城市扩展。

加拿大马尼托巴大学水资源工程副教授Tricia Stadnyk说，对于这些超过100年的长期研究，使用其他水平衡模型获得准确结果是一个重大挑战。“许多水平衡模型在模拟溪流、河流和其他水体中的水流量方面做得很好，但在正确计算蒸散量方面却很差，”她在谈到水从陆地蒸发和水从植物向大气运动的过程时说。“对于气候变化预测来说，这是一个巨大问题，因为我们考虑的一个大问题是蒸散。”

由于气候变化，气温变得更为极端，蒸散率也是如此。蒸散量越大，地表水就越少，反之亦然。这继而影响整个年度水循环，并可能导致不可预测的极端情况，即从水太少，导致干旱，到水太多，导致洪水。

没有一种气候能不受这些变化的影响。这些变化会影响加拿大这样的气候，那里60%以上的土地是某种形式的永久冻土，四季鲜明；或者影响像埃塞俄比亚那样的气候，那里大部分地区属于热带，全年气温几乎保持



不变。

通过调整模型可以获得这些不同状况，使得模型在全球范围内都适用。来自几个国家的科学家正与原子能机构合作，在利用原子能机构的同位素水平平衡模型和其他模型改进水资源管理方面得到培训和支持。例如，

在埃塞俄比亚，正在启动一个为期三年的技术合作项目，以研究上阿瓦什盆地——一个向260多万人提供淡水的大型地下水库。如加拿大等其他国家正在建立或已经建立同位素取样网络，以提高使用诸如原子能机构的模型时的准确性。

国际原子能机构的同位素水平平衡模型可以帮助专家准确可靠地预测气候变化对未来水资源的影响。

(图/国际原子能机构 L. Toro)

国际原子能机构的同位素水平平衡模型

科学家们利用原子能机构的同位素水平平衡模型来模拟和估计气候变化对整个水循环过程——从大气到地表，再到地下，然后循环往复——中水的运动和可用性的长期影响。该模型每月将每个水平平衡组件的同位素质量平衡纳入其中，以改进其校准和验证过程。

该模型最早于2015年推出，其用户友好型开源软件包括预处理、建模和分析工具，以便更容易插入数据，使结果可视化和进行分析。它被设计用于处理与气候、植被、降水、水流、地形和土壤等相关的各种当地和全球数据集。用于校准模型和验证其结果的同位素数据通常利用本地收集的数据，以及来自全球存储库的数据，例如原子能机构的全球降水同位素网（见第18页）和全球河流同位素网的数据。





取得好成绩

国际原子能机构测试实验室分析水的能力

文/Laura Gil

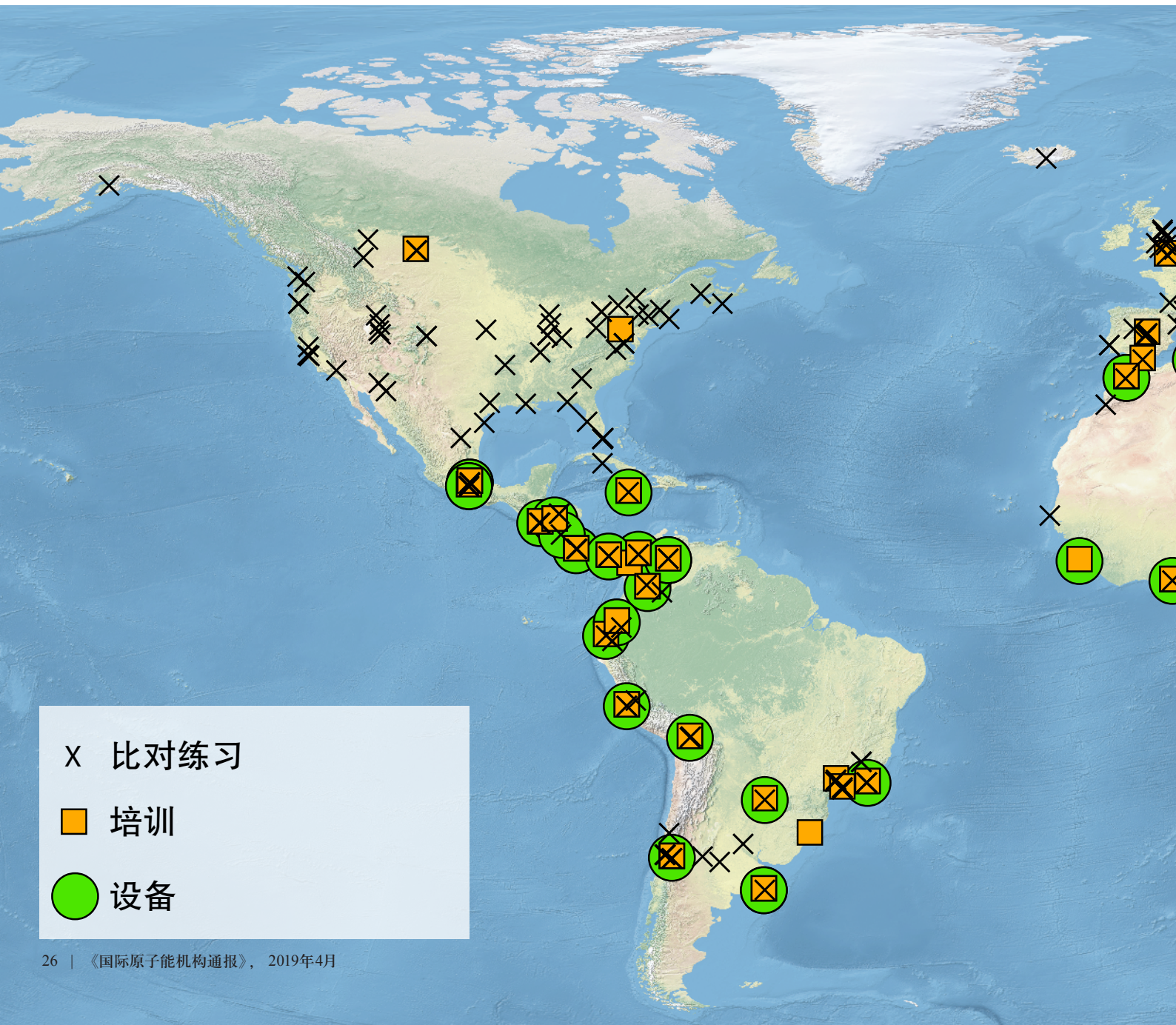
优秀、良好、有问题或不可接受：您的水化学分析能力如何？科学家通过比对就可以给出答案。在过去30年中，国际原子能机构一直在数百个实验室进行同位素水文学实验室间比对，并已成为同位素水文学水平测试的全球来源。

“任何科学的一个关键方面就是测量的质量，”墨西哥水技术研究所水文技术专家Luis González Hita说。“对于

同位素水文学也是如此。保证我们的数据正确可靠，为我们说服决策者提供了坚实的基础。”

同位素水文学家是使用同位素数据研究水资源的科学家。他们的研究为制定保护水资源的战略和政策提供了重要信息。大约每四年，300多个同位素水文学实验室参加由原子能机构组织的全球实验室间比对水平测试。

将数据与原子能机构测试样品（包



括来自世界各地的各种水域) 进行比较, 可帮助每个实验室的工作人员发现并改善分析缺陷, 帮助他们确保始终如一地生成准确、精确的数据。

定期交叉比对目前越来越重要: 技术在迅速发展, 使同位素水文学方法和仪器更便宜, 更容易获得。虽然这些技术变化有其好处, 但也会带来更高的错误风险, 因为该领域新手往往缺乏高级培训。

“当今, 特别是基于激光方法的技术可以完成很多工作,” González Hita 说。“这意味着科学家们更多地依赖方法进行评估, 但也意味着对技能的依赖减少。”

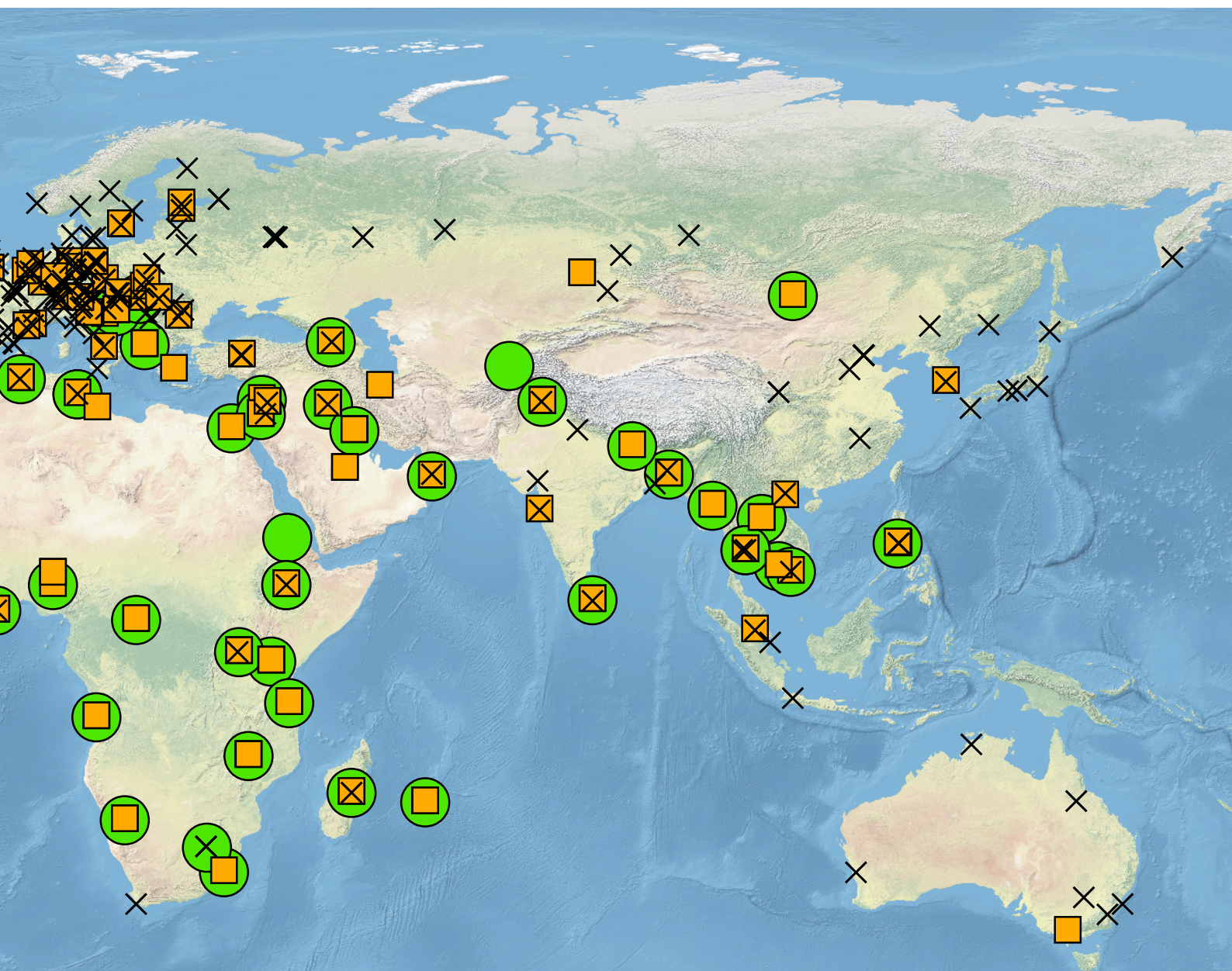
追求卓越

有两种类型的实验室间比对项目。一种是“水同位素实验室间比对”(WICO), 测试实验室测量水样中氘(^2H) 和氧-18(^{18}O) 的能力。准确测量这些同位素使科学家能够确定水的年龄和来源(详见第4页)。

另一种是“国际氚比对”(TRIC), 检查实验室测量水中天然放射性同位素氚(^3H) 的能力。氚测量用于分析水的补给率和研究60年以下的水(见第4页)。“国际氚比对”检查这些测量的准确性和正确性。最近的“国际氚比对”练习于2018年举行, 有90个实验室参加。

该图示出了自2016年以来参加实验室间比对活动(WICO和TRIC)的城市、自2007年以来原子能机构为同位素水文学专家提供了培训的地方, 以及自2007年以来原子能机构通过原子能机构技术合作计划捐赠同位素激光仪器的场所。

(来源: 国际原子能机构)



“任何科学的一个关键方面就是测量的质量。对于同位素水文学也是如此。保证我们的数据正确可靠，为我们说服决策者提供了坚实的基础。”

—墨西哥水技术研究所水文技术专家Luis González Hita

“这些实验室间比对项目的工作方式很简单，”位于奥地利维也纳的原子能机构同位素水文学实验室主任Leonard Wassenaar说。“我们在这里准备并仔细验证水样，然后将它们运送到每个实验室。这些实验室对其进行分析并将结果发送给我们，我们接着将其与原子能机构参考值进行比较。最后，我们将结果汇总到一份总体匿名报告提供给科学界，同时向每个实验室单独发送一份详细报告，并提出改进意见和建议。”

原子能机构在每次练习后产生的报告包含循证建议，以帮助实验室改进方法和提高实绩。它们还通过原子能机构技术合作计划帮助原子能机构专家找出差距并提供进一步援助，包括培训实验室工作人员。

测试警惕性

有史以来规模最大的稳定同位素全球实验室间比对是最近于2016年进行的“水同位素实验室间比对”练习（“WICO 2016”），涉及235个实验室。其结果于2017年11月发表在《质谱学快报》科学杂志上。

在“WICO 2016”练习期间，Wassenaar和他的团队尝试了一些新的东西。

“我们在其中一个水样中添加了甲醇，以测试实验室在检测干扰污染物方面的警惕性——当然，没有提醒他们，”Wassenaar说。“在发现许多人忽视了这一点之后，我们为他们确定水中存在干扰污染物可能导致错误结果提出了一些策略。”

参与“WICO 2016”的大多数实

验室在分析氧同位素时产生了可接受的优异结果，在分析氦时大约有一半实验室产生了这样的结果。但是约有5%到6%的实验室产生了不可接受的糟糕结果，Wassenaar认为这可能是由于实验室仪器（例如低成本激光器）数量迅速增加所致，尤其是经验不足的实验室。

“我们的结论是，实验室表现不佳可能是源于无法量化的“已知的未知因素”，Wassenaar说。“当实验室看起来做得很好但仍然表现不佳时，可能是源于出现例如以下错误：用Excel处理电子表格时出现错误，或者仪器没有得到正确维护。这些错误和人为差错虽然常见，但对该实验室可能并非显而易见。”

他补充说，这些包括基于知识或基于技能的因素，例如操作人员经验、基本数据处理错误、测量违规、样品受损或分析仪器功能不良。

最近在《认证和质量保证》杂志上发表的研究表明，人为差错可能会对表现不佳的地球化学分析结果产生重大影响。“WICO 2016”后对参与实验室的调查证明了这一假定，即人员、技术和仪器差错是造成水同位素分析实绩不佳的主要因素。

“发现错误就要进行调整。知道我们在哪方面产生的结果可靠，哪方面的结果不可靠，这一点很重要，”González Hita说。他在墨西哥的实验室在最新的WICO测试中得分很高。“‘WICO 2016’使我们得以确认是否正在进行高质量的分析。对邻国来说，这也是一件好事，因为他们可以依靠我们的服务，我们可以分享最佳实践。”

城市水管理：同位素水文学的作用和开普敦水危机的教训

文/Jodie Miller

2017年至2018年南非开普敦的水危机为评价同位素水文学在维持城市供水网络完整性方面的作用提供了机会。供水的完整性对南部非洲经济的长期可持续性至关重要，需要了解气候与水资源利用之间的关系以及这种关系对社会经济因素的影响。一个地区的水预算——水输入和输出之间的关系——具有重大的社会经济影响，包括支持城市中心、减少贫困、保护粮食和能源供应以及发展科学技术，为当地水管理战略提供信息的能力。

近年来，由于严重的干旱已经影响到开普敦——位于非洲南端约有380万人口的城市，这些问题到了非解决不可的地步。2014年至2017年期间降雨量低于平均值，导致开普敦在2017年至2018年夏季出现极端用水压力。该市大部分供水来自总容量为8289.91亿升的六个地表水储存设施。到2018年3月，这些设施的总存储量达到了最低记录水平，低于20%，其中最大的水库——希沃特思路夫（Theewaterskloof）水库，仅剩其4801.88亿升容量的13.5%。政府发布了各种公告，宣布即将到来的“零日”——即这一天该市将关闭市政供水，以维持医院等最关键基础设施。作为应对措施，要求所有居民将每人每天的用水量减少到50升。

最终，“零日”没有到来。该市为节约用水所做的集体努力使储存的水持续到冬季降雨到来。然而，关闭市政供水网络的可能性改变了人们使用和重视水的方式，并带来了用水模式

的真正改变。与此同时，一个大型城市中心如何保护和补充其短期水安全的问题也提出了重要的科学问题，包括我们如何跟踪和衡量许多不同的水输入对供水网络的相对贡献。海水淡化、灰水回收、直接雨水收集和地下水抽取都被用于以各种规模补充许多市政管网中的地表水蓄水池。但是这些会影响水质。根据日益多样化的输入流管理水量和水质，需要新的方法和科学工具来制定最佳实践策略。

城市同位素水文学

可用于帮助跟踪市政网络不同输入水源的科学工具之一是研究水的稳定同位素。研究和应用水循环中天然存在的氢和氧同位素是同位素水文学的核心。

由于普遍的城市化和人口的增长，近年来城市同位素水文学作为一种了解城市供水过程的工具得到了广泛的关注。城市同位素水文学最重要的组成部分是“指纹识别”，即城市水网每个输入的同位素特征，以通过该系统跟踪每个组成部分。这些信息可供水资源管理者用于规划长期和短期的水资源管理政策，包括监测相关贡献、网络中的停留时间、系统泄漏和由此造成的损失以及污染或玷污管理。

对从斯泰伦博斯大学所在地、该国主要葡萄酒产区中心斯泰伦博斯镇的私人住宅采集的自来水样进行了分析，以确定氧-18 (^{18}O) 和氘 (^2H) 的同位素比率。结果描绘了一幅迷人的画面，显示了城市同位素水文学在“监视”



Jodie Miller是南非斯泰伦博斯大学地球科学系副教授。她主要从事莫桑比克、纳米比亚和南非的同位素水文学项目。她参与了国际原子能机构关于城市同位素水文学的协调研究项目，是国际地球化学协会副主席、南非科学技术部生物地球化学研究基础设施平台的拥护者。



2014年以来的平均降雨量已使南非西开普省希沃特思路夫水库的水位降至临界水平。

(图/国际原子能机构A. Silva Garduno)

城市水网的波动的敏感程度。同位素比率记录的不是我们肉眼看到的来自水龙头的均匀的水，而是水的高低、相称和分散的模式。

同位素从本质上提供了当地供水网络各部分的指纹特征：来源、不同

的处理厂，以及配水网络中剩余水量的信息。随着水资源管理者寻求为世界各地日益增长的城市中心提供长期可持续供水，城市同位素水文学将成为水资源管理者工具包的一个重要组成部分。

Jodie Miller在西开普省采集水样。

(图/国际原子能机构A. Silva Garduno)



同位素测绘地下水污染和更新

文/ Joel Podgorski、Michael Berg 和 Rolf Kipfer

由于人口增长、水资源过度开采、土地利用和气候变化，获得供饮用、工业和农业使用的优质地下水变得越来越困难。地下水资源提供世界50%的饮用水和43%的灌溉用水。但近地表地下水含水层很容易受到肥料和农药、化学品泄漏和废水的污染。此外，由于水位迅速下降，过度开采和从含水层中不受控制地取水可能导致供水损失。

为了帮助水管理者保护和节约地下水资源，含水层脆弱性图能够发挥重要作用，有助于确定对污染或过度开采特别敏感的景观区域，从而有助于为水管理和治理工作提供信息。绘制地下水脆弱性图也是支持“联合国可持续发展目标6”的关键。该目标要求为所有人提供可持续用水，特别是安全用水（目标6.1），并倡导综合水资源管理（目标6.5）。

含水层脆弱性

从技术角度来看，有很多方法可以评估含水层对水污染或过度开采的脆弱性。过去，人们使用一般地质特征、井眼数据和地区水文数据。然而，这些数据通常是不精确或不准确的，或完全缺失。人们使用复杂的计算机模型，但这些模型需要准确的数据并且经常受较高的计算成本和有限的数据可用性影响，因此通常仅限于小的研究区域。

化学指标和统计分析可用于将可用的环境数据与地下水脆弱性联系起来。例如硝酸盐，它是一种主要由

农业带来的水污染物，易于测量且成本低廉。为了产生地下水脆弱性或保护图，必须获得适当的关注区域内的污染物（如硝酸盐）或脆弱性指标数据，以生成可靠和准确的预测图。

在线绘制

为证明含水层脆弱性统计图的有效性，利用免费在线地下水评估平台（www.gapmaps.org）重新分析了加拿大现有脆弱性图的数据，通过地下水评估平台的含水层脆弱性图，在不需要收集整个研究区域的大量数据的情况下，得出了较高含水层脆弱性的精确概率预测图。

利用氚绘制水补给率图

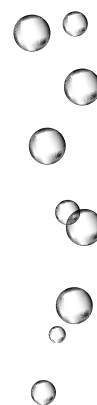
痕量放射性同位素氚在降雨中通过高层大气中宇宙射线的相互作用自然产生。在1952年至1962年间进行的地上核武器试验期间，大量的氚被注入水循环，因此成为现代地下水补给的一个可测量指标。虽然降雨中的全球氚水平此后已降至核试验前的低天然水平，但灵敏的分析检测能力仍然可以使我们能够准确地检测到这一同位素。

使用氚（ ^3H ）进行绘图的一个主要优势在于该同位素是水分子的基本构成要素，因此存在于降雨中。这意味着在水循环其他部分（河流、湖泊、地下水）中任何可检测到的氚都可揭示来自近期降雨的现代水的存在情况，从而可以告诉我们，我们正在处理的水来自过去几十年——我们可



Joel Podgorski、Michael Berg和Rolf Kipfer在瑞士联邦水生科学和技术研究所（Eawag）水资源和饮用水部门（W+T）工作。

瑞士联邦水生科学和技术研究所是一家瑞士水研究机构，致力于研究可持续处理水体和水资源的概念和技术。该研究所与各大学、其他研究机构、公共机构、工业界和非政府组织合作，通过其全球网络，努力协调用水方面的生态、经济和社会利益。



以利用这些数据直接确定和绘制含水层脆弱性经过降雨对污染的易感性，即使地下水从未被污染过。

到目前为止，用于估算含水层脆弱性的统计绘图方法通常没有广泛用于氡测量。这是因为氡通常未被包括在地下水研究中，并且分析依然成本很高。与此同时，其他易于收集的水质或同位素参数可用于脆弱性绘图。例如，碳-14、水的稳定同位素组成（ ^2H 、 ^{18}O ）、硝酸盐和氯化物也可以帮助评估地下水年龄或验证其是否已受到污染影响。

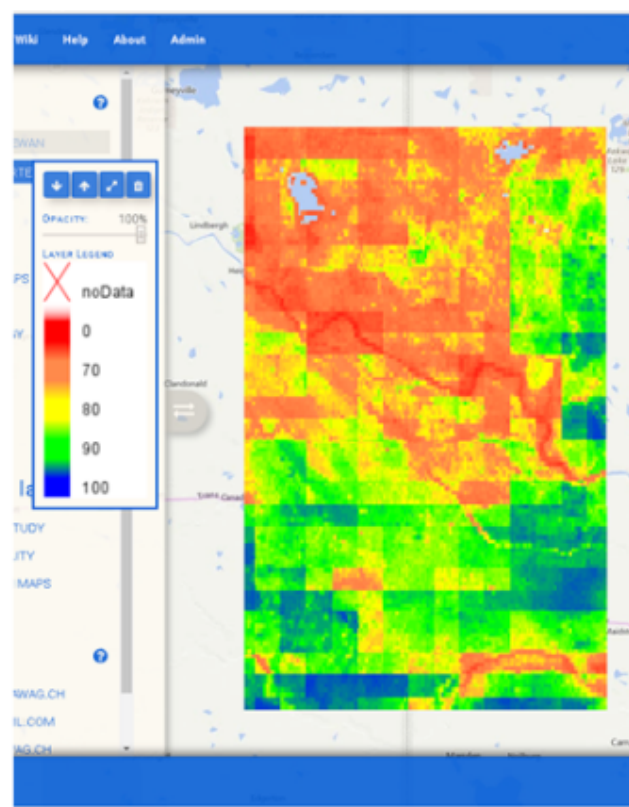
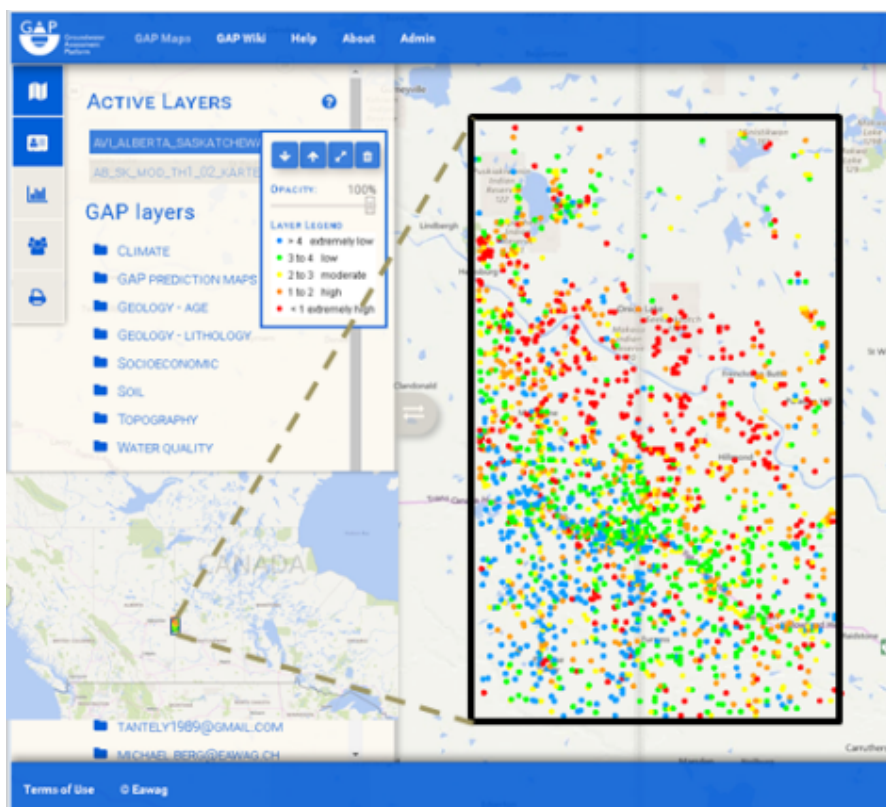
利用同位素和化学对含水层脆弱性和地下水补给进行统计和在线绘图，

是一个重大进步，也是氡和相关天然同位素示踪剂的一项实际应用。目前，将原子能机构有关 ^3H 、 ^2H 和 ^{18}O 的广泛全球数据集以及上述地质统计绘图应用于全球地下水和地表水质量和数量问题研究具有巨大潜力。原子能机构正在与瑞士联邦水生科学和技术研究所合作，在这一领域作出新的努力，以便对全球范围内的安全饮用水进行循证评估和绘图。我们还期望利用同位素测绘技术协助世界各地的专家以平衡和可持续的方式管理地下水。

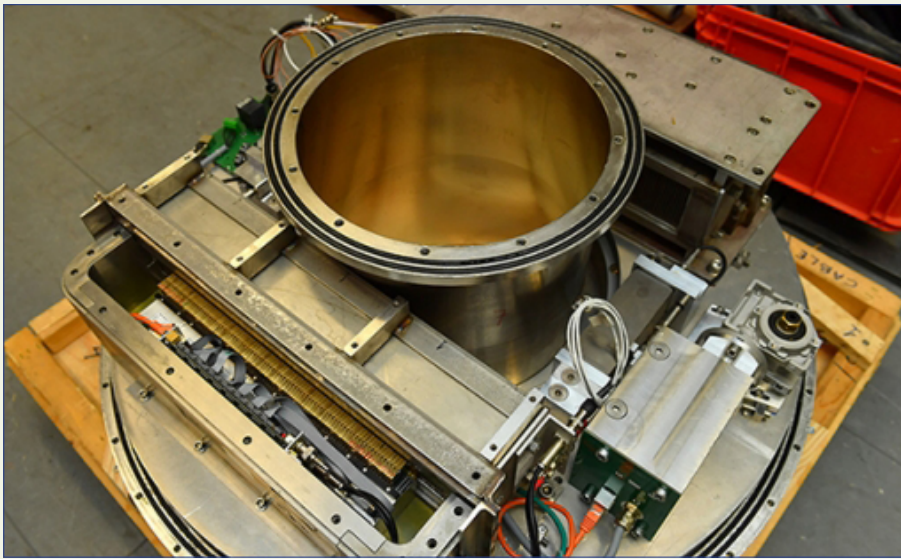
本文系与国际原子能机构同位素水文学家合作撰写。

加拿大西部的一项指数含水层脆弱性研究（左）与在线地下水评估平台上这些脆弱性指数值的新逻辑回归图（右图）的比较。红色表示脆弱性最高的区域。绿色区域不易受到影响或受到足够的地面污染保护。

（图片来源：瑞士联邦水生科学和技术研究所）



新的保障工具加强了国际原子能机构对乏核燃料的核查



用于核实乏核燃料的非能动 γ 发射断层照相工具内部组件。
(图/国际原子能机构D. Calma)

对于所有有生效全面保障协定的国家，原子能机构力求核实所有核材料仍用于和平活动中。它通过实施称作保障的各种技术措施来实现这一目标。新的非能动 γ 发射断层照相（PGET）工具将使原子能机构能够核实乏核燃料组件中的燃料棒（或燃料细棒）的数量。

与用于核实乏核燃料内容物的其他工具（例如数字切伦科夫观察装置和乏燃料属性测试仪）不同，非能动 γ 发射断层照相工具

还可以确认贮存在封闭容器中的乏燃料组件燃料细棒有无缺失。这对于在核电厂、水下贮存设施和地质处置库封装厂实施保障非常有用。原子能机构技术专家Tim White认为，使用非能动 γ 发射断层照相工具核实核材料将是“对原子能机构保障工具箱的非常宝贵的补充”。

燃料棒在反应堆中的使用寿期结束后要进行贮存和最终处置，在某些情况下，要进行后处

理。核实燃料棒中的核材料不被从和平利用中转用，是向国际社会保证各国正在履行其不扩散义务的关键环节。

为了检测是否存在铀或钚，非能动 γ 发射断层照相工具同时进行三种测量——中子和 γ 射线总计数、 γ 射线光谱测量和乏燃料细棒位置的断层成像。这个工具只需五分钟即可完成这些测量，再用一分钟处理和分析数据。通过这种方式，非能动 γ 发射断层照相“为视察员提供额外的数据点，”White说。“它可以更全面地勾画出活动情况，并提高核查过程的稳健性。”

原子能机构仍处于将非能动 γ 发射断层照相法纳入其保障活动的早期阶段。该技术已在三个核电厂的乏燃料池中进行了测试，现准备部署在保障核查实践中，并供保障视察员现场使用。欧洲原子能共同体也表示有兴趣利用这项技术进行核查活动，许多国家也可能效仿。

文/Matt Fisher

在乌兹别克斯坦举办的国际原子能机构讲习班重点关注核电厂选址和场址评价

据当地官员证实，最新启动核电计划的国家乌兹别克斯坦已开始核电厂选址过程，目标是在2020年9月获得场址许可证。乌兹别克斯坦是正在考虑、计划或积极努力将核电纳入能源结构的约30个国家之一。

应乌兹别克斯坦政府的请求，国际原子能机构和乌新建核

能发展机构Uzatom于2019年2月在塔什干举办了关于核电厂选址和场址评价中考虑的安全和非安全方面的讲习班。

有Uzatom、核监管机构和其他相关国家组织参加的这次讲习班侧重于国际原子能机构安全评审服务、安全标准和支持核电厂选址和场址评价的其他资源。

“启动核电计划需要对核安全作出长期承诺，而这一承诺在作出启动核电的决定后即开始实施。”国际原子能机构核装置安全处处长Greg Rzentkowski表示。“该过程早期的两个重要步骤是建立有效的法律和监管框架，并确保在选择核装置之前对潜在场址进行适当评价。原子能机构安全标准在这两个领域提供

引进核电



核电“里程碑”方案是一种用于协助正在考虑或规划其首座核电厂国家的分阶段的综合方法。(图片来源：国际原子能机构)

碑”方案，其中将“场址和配套设施”列为需要在发展核电计划过程中采取行动的19个核基础结构专题之一。

根据“里程碑”方案，原子能机构提供涵盖安全、安保、法律和监管框架、人力资源发展、应急规划和保障等各种综合服务，其中包括各种同行评审和咨询工作组访问，如综合核基础结构评审、场址和外部事件设计评审服务。

了明确指导，我们鼓励所有国家适用这些标准。”

这次讲习班介绍了原子能机构关于发展新核电计划的“里程

文/Ayhan Altinyollar

核技术如何助力中国农业发展



核技术应用已完全纳入中国农业科学院的农业研究。图为一名技术人员正在为食品安全检测准备样品。(图/国际原子能机构M. Gaspar)

省级农业科学院。这可确保研究成果立即投入使用。

事实上，中国第二个最广泛使用的小麦突变品种“鲁源502”就是由中国农业科学院作物科学研究所和山东省农业科学院利用太空突变育种（见第35页“科学”栏）技术开发的。作物科学研究所副所长刘录详表示，该品种的产量比传统品种高出11%，对于干旱和主要病害的耐受性也更强。它的种植面积超过360万公顷——面积几乎与瑞士一样大。刘说，它是为提高耐盐性和抗旱性、提高品质和产量而开发的11个小麦品种之一。

通过与原子能机构和粮农组织的密切合作，中国在过去60年中已推出1000多个突变作物品种，中国开发的品种占原子能机构/粮农组织全球生产的突变品种数据库中当前所列突变体的四分之一，粮农组织/原子能机构粮农

中国拥有19%的世界人口，但只有7%的可耕地，因而处于不利地位：如何在保护自然资源的同时改善日益增长和富裕起来的人口的粮食供给。过去几十年来，该国的农业科学家在作物生产中越来越多地使用核技术和同位素技术。他们正在与原子能机

构和联合国粮食及农业组织（粮农组织）合作，利用辐照帮助亚洲及其他地区的专家开发新的作物品种。

在许多国家，农业核研究由独立于国家农业研究机构的核机构进行，而在中国，核技术的农业应用被纳入中国农业科学院和

核技术联合处植物育种和遗传学科科长Sobhana Sivasankar说。她补充说，该研究所建立的新突变诱导和高通量突变体筛选方法成为世界各地研究人员的范例。

该研究所使用重离子束加速器、宇宙射线和伽玛射线以及化学物质来诱导小麦、水稻、玉米、大豆和蔬菜等各种作物的突变。“核技术是我们工作的核心，完全融入植物品种的开发，以改善粮食安全，”刘说。

多年来，该研究所也成为原子能机构技术合作计划的主要捐助者：来自30多个国家的150多名植物育种人员参加了在中国农业科学院举办的培训班，从进修中受益。

印度尼西亚核能机构BATAN同位素和辐射应用中心主任Totti Tjiptosumirat说，BATAN和中国农业科学院正在寻求合作进行植物突变育种的方法，同时印度尼西亚研究人员在寻找学习中国经验的方法。“积极传播和推广中国在植物突变育种方面的活动将有利于整个亚洲的农业研究，”他说。

从食品安全到食品防伪

中国农业科学院的其他几个研究所在其研究和开发工作中使用核相关技术和同位素技术，并参与了原子能机构的若干技术合作项目和协调研究项目。农产品

质量标准与检测技术研究所已经开发出一种利用同位素分析检测假蜂蜜的方案。据估计，中国作为蜂蜜销售的大量产品是在实验室中合成生产的，而不是由蜂箱中的蜜蜂酿成的，因此这是打击欺诈者的重要工具，该研究所负责利用同位素技术开展这项研究工作的人员陈刚说。他补充说，还制定了一项利用稳定同位素追踪牛肉地理来源的计划。

该研究所利用同位素技术检测牛奶和乳制品的安全性并验证其真实性——这是原子能机构在2013年至2018年期间协调研究项目和技术合作项目的结果。“经过几年的支持，我们现在完全可以独立自主地开展工作，”陈刚说。

提高营养效率

中国农业科学院各研究所利用稳定同位素研究动物对营养物质的吸收、转移和代谢。研究结果被用于优化饲料成分和喂养计划。同位素示踪比传统分析方法具有更高的灵敏度，在研究微量营养素、维生素、激素和药物的吸收时具有明显优势，畜牧兽医研究所教授卜登攀说。

虽然中国已经完善了许多核技术的使用，但在一些领域，它正在寻求国际原子能机构和粮农组织的支持：该国乳制品行业



中国科学家正在寻求利用核相关技术在北京附近的一个农场更好地追踪牛的代谢，并提高奶牛利用饲料中的氮量。

(图/国际原子能机构M. Gaspar)

受奶牛蛋白质吸收率低困扰。反刍动物对动物饲料中的蛋白质吸收不到一半，其余蛋白质经粪便和尿液排出。“这对农民来说是浪费，粪便中的高氮含量有害环境，”卜说。使用同位素追踪氮从饲料到动物体内的过程，可以通过对饲料成分进行必要的调整来提高氮的效率。这一点尤为重要，因为中国的乳制品消费量目前仍处于全球人均消费量的三分之一，而且持续增长。“我们正在通过国际原子能机构和粮农组织寻求国际专门知识，以帮助我们解决这一问题。”

文/ Miklos Gaspar

科学 空间诱变育种

辐照导致突变，产生随机遗传变异，导致具有新的和有用性状的突变植物。突变育种不涉及基因转变，而是利用植物自身的遗传成分，模仿自发突变的自然过程，即进化动力。通过使用辐射，科学家可以大大缩短培育新的和改良植物品种所需的时间。

空间诱变育种，也称空间诱变，涉及将种子带到太空，那里宇宙射线更强，这些射线用于诱导突变。卫星、航天飞机和高空气球被用于进行这些实验。这种方法的一个优点是植物受损风险低于在地球上使用辐射时的风险。

数以千计 国际原子能机构出版物 免费在线



IAEA
国际原子能机构
原子用于和平与发展

www.iaea.org/books

sales.publications@iaea.org

气候变化与核电作用国际会议

2019年10月7日至11日

奥地利·维也纳



主办单位：



IAEA

国际原子能机构
原子用于和平与发展

原子用于气候

CN-275



在线阅读本期和其他各期《国际原子能机构通报》：www.iaea.org/bulletin

更多了解国际原子能机构及其工作，请访问网址：www.iaea.org

或通过以下方式关注我们：     

或查询网站：h2o.iaea.org