
“看不到地下水流，就把它‘画’出来”

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/15204.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

“看不到地下水流，就把它‘画’出来”。人往高处走，水往低处流这句话，揭示着世间再平常不过的规律。然而，凡事都有个例外，比如，在我们脚下的深地，水不一定只往低处流。

地下水如何循环，是地下水科学研究最基本的问题之一。尽管早在1963年匈牙利裔加拿大科学家 J. Tóth 就用解析方法绘制了地下水系统复杂的多级嵌套结构，但人们很少从现场观测和试验中真正认识地下水流情况，这大大限制了地下水系统理论的完善和相应的深地开发利用。

8月9日，我国同位素水文地质领域的研究人员主导发表在《地球物理研究快报》（GRL）上的一篇重磅国际合作研究论文——《钻井地下水年龄和化学成分剖面上转折点揭示盆地多级嵌套地下水系统》，不仅佐证了地下水并不只是往低处流，更揭示了地下水循环的丰富内涵和精湛细节，这将为我国深地资源开发利用提供难得的科学基础。

论文在线发表后，《中国科学报》联系采访了该论文的第一作者、中国地质调查局西安地质调查中心高工张俊，以及论文通讯作者之一、中科院地质与地球物理研究所研究员庞忠和。

地下水多大岁数？取出来测一测

地下水循环的问题在地下水科学研究领域的基础地位，堪比爱因斯坦定律之于物理学。然而，与地表水相比，地下水不可见及其水系统结构复杂的属性，使得人们在野外识别它的难度很大。

看不到它，就把它画出来。在内蒙古高原的鄂尔多斯盆地，科学家们以这里的地下水系统为对象，施展起了他们的绘画天才。不过，他们用来作画的笔墨，是钻井剖面上的地下水年龄数据和地球化学成分信息。

水从地表渗入地下开始算起，到采样时所经过的时间，就是地下水的年龄。庞忠和告诉《中国科学报》，通过摸底不同地点地下水的年龄、水位等情况，再结合化学成分特征画线，找到转折点，就能准确描摹地下水的多级嵌套循环系统。

而要获得实测地下水年龄和化学成分，首要的问题就是要精准取样。然而由于钻孔内地下水一般处于运动状态，传统的全井抽水试验方法很难取到不同深度的分层样品，而详细的分层样品数据恰恰是刻画地下水系统结构的关键信息。

工欲善其事，必先利其器。创造和改进试验和测试技术，是研究团队要闯的第一道关。

庞忠和告诉记者，双栓塞（double-packer）地下水分层采样与试验系统最早于本世纪初经由国际原子能机构（IAEA）技术合作项目引入我国，在深层地下水勘查和高放核废物地质处置选址项目中开始应用。但是，它在实践中也遇到一些问题。2010年以后，中国地质调查局水文地质环境地质调查中心的研究人员重新设计了双栓塞分层抽水试验系统，在设备材质、耐压性能、止水效果等方面加以改进，使其能够适应我国深井高水压条件下的分层取样要求。

国产新设备可以满足水文地质勘查工作需要。张俊对《中国科学报》介绍说，在鄂尔多斯盆地，我们通过控制取样流量和降深，并通过建立水质现场监测评价方法，避免了取样过程中‘层间越流’和外来水混入的可能。张俊表示，这些举措有效提高了采样质量，为精细刻画地下水系统打下了可靠的基础。

取样之后就是定年。不过，常用的氚（ ^3H ）和碳（ ^{14}C ）同位素方法测定上限分别为60年以内和4万年以内，这对于年龄动辄超过4万年的大型盆地深层地下水而言，显得不够用。

本次研究采用了最新的氪（ Kr ）同位素定年技术。庞忠和对《中国科学报》介绍说，5年前我们和中国科技大学教授卢征天团队合作，开展测量技术和应用条件的研究。

Kr 是惰性气体， ^{81}Kr 的半衰期是23万年，定年范围可达130万年，而且 ^{81}Kr 在地下无干扰源，化学性质稳定，不和其他物质发生反应，是古老地下水的理想定年方法。但该方法的应用长期受限，这缘于 ^{81}Kr 同位素在自然界中的丰度极低，传统方法很难以检测到。

在破解这一难题过程中，量子测量技术发挥了重要作用。庞忠和告诉记者，基于激光冷却原子阱技术（ATTA），卢征天团队自主研发了ATTA痕量同位素分析实验装置，为 ^{81}Kr 的痕量分析提供了测量神器，现在定年只需要20千克水样，大大拓展了该方法应用领域。

卢征天团队也是本次研究的重要参与者。他告诉记者，ATTA是一种量子测量技术，该方法可实现单原子水平的计数，具有极高的灵敏度。

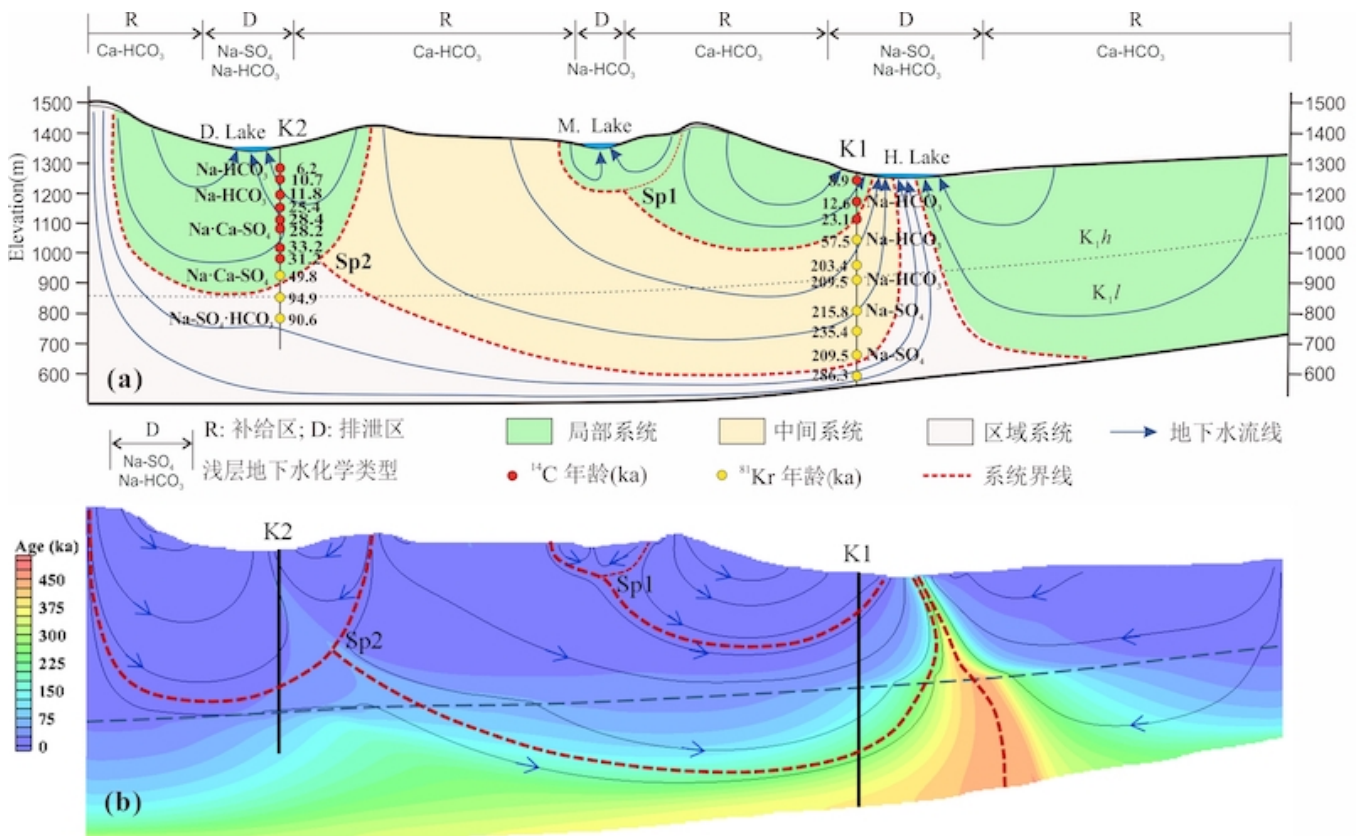
ATTA可以在每微升为10-14同位素水平(STP)的氪气中计数极低浓度的 ^{85}Kr 和 ^{81}Kr 原子。卢征天对记者解释道，通过技术改进，他们目前已经获得了更好的原子冷却、收集和检测效率，可将 Kr 同位素定年实际应用所需的地下水样品量从200kg减小到20kg，并提高了测量精度和定年范围。现在，中国科学技术大学是国际上唯一拥有有能力实现地下水采样、气体分离提纯和ATTA同位素分析完整流程的实验室的单位。

在ATTA技术加持下， Kr 同位素定年法已成为国际上公认最好的古地下水定年方法。庞忠和说。

让地下水流显形

综合运用地下水分层抽水试验系统、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{81}Kr 和 ^{85}Kr 以及水化学成分等多种示踪定年和数值模拟等技术，研究团队在钻孔内确定了详细的地下水位、年龄和地球化学实测剖面。

这些剖面可以帮助我们更好地地区别地下水多级嵌套系统之间的界面。张俊说，通过这些实测剖面与数值模拟结果得到的地下水流场和年龄场进行对比验证，就可以基于多种证据圈定地下水系统的空间结构，从而有效识别并精细刻画出地下水系统的多级嵌套结构（如图）。



鄂尔多斯乌审召盆地地下水系统的多级嵌套结构：（a）图是地下水流系统多级嵌套结构示意图，（b）图是地下水流和年龄数值模拟结果。张俊供图

与前人在鄂尔多斯盆地的研究结果（地下水最大年龄4万年）相比，该研究首次发现超过20万年的地下水，得到的地下水年龄剖面比以往研究更加精细准确，使人们对鄂尔多斯盆地地下水循环规律的认识达到了新的高度。

这是我国地下水科学界20年努力的一个里程碑式的进展。庞忠和告诉《中国科学报》：如果说上个世纪澳大利亚大自流水盆地的研究给人们呈现了大型沉积盆地地下水循环的宏大格局的话，今天我国的鄂尔多斯盆地则展示了这个循环系统的丰富内涵和精湛细节。而这恰恰反映了其本质特征。

而在研究中先后涌现的科技突破——研究团队成功实现了packer和ATTA设备的国产化，更让庞忠和心生感慨：从同位素水文地质学角度来讲，packer和ATTA两项顶尖技术整合起来，再加上科学深钻连井剖面的研究平台，无疑是做深层地下水科研的最好状态了。

为深地应用筑牢科学基础

谈及该研究的意义，庞忠和表示，总的来说，这是一项应用基础研究，其对区域尺度地下水系统理论研究提供了重要佐证；并且它结合了地球系统科学的概念，也有力推动了地下水科学向前进步。

不仅如此，尽管目前还无法直接评估该成果的实际应用价值，但其对于深地资源和空间利用的指导意义仍然非常可观。

比如核废料处置、二氧化碳地下封存等，需要寻找一个安全、稳定的地下环境，只有类似区域尺度地下系统被精细刻画以后，人们才好决定去哪儿封存。庞忠和展望道，这在当前碳中和背景下意义深远。

当然，这类研究对于地下水的资源评价和可持续开采而言，是必不可少的理论基础。

庞忠和举例说，近年来，作为世界上三个最干旱的极端干旱区之一的新疆，居然也时不时会发生洪水现象——这是全球变暖、气温升高以后冰川融化退缩的结果。干旱地区发洪水的时候怎么办？当我们了解清楚了地下水文状况后，我们给新疆提供了具体建议：把多余的冰川融水存在地下，建一个地下水库。这作为应对气候变化的一个手段，现在已经行动起来了。

此外，相应的理论成果还将进一步指导区域地热资源开发、地下空间利用等的开展。庞忠和说，在当前全球应对气候变化的大背景下，深地开发是一个重要手段，但在之前，我们需要先解码。

该项研究是基于中国地质调查局1999年以来在鄂尔多斯盆地实施的一系列地下水勘查研究项目，由中国地质调查局西安地质调查中心牵头，先后联合中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质大学（北京）、南京大学、长安大学、中国科学技术大学等多个科研团队，包括澳大利亚弗林德斯大学专家共同参与，在国家和国际原子能机构（IAEA）项目支持下，经过长期研究获得的成果。（来源：中国科学报赵广立）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1029/2020GL092337>

版权声明：凡本网注明来源：中国科学报、科学网、科学新闻杂志的所有作品，网站转载，请在正文上方注明来源和作者，且不得对内容作实质性改动；微信公众号、头条号等新媒体平台，转载请联系授权。邮箱：shouquan@stimes.cn。

作者：庞忠和等 来源：《地球物理研究快报》

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发