

核磁共振找水方法

潘玉玲 李振宇 万乐

(中国地质大学(武汉))

1. 简介

核磁共振(NMR)技术是当今世界上的尖端技术,用核磁共振方法直接探查地下水是该技术应用的新领域,开创了地球物理方法直接找水的先河。

利用核磁共振技术找水的首创国是前苏联。从1978年起,前苏联科学院西伯利亚分院化学动力学和燃烧研究所(ICKC)以A G Semenov为首的一批科学家开始了利用核磁共振技术找水的全面研究。他们用三年时间研制成了原型仪器,在其后十年间对仪器进行改进,开发出世界上第一台在地磁场中测定NMR信号的仪器,称为核磁共振层析找水仪(Hydroscope)。该仪器作为新的探测地下水的重要手段,于1988年在苏联和英国申请了专利。在此期间他们进行了仪器改进和解释方法的研究,试验研究遍及前苏联的大部分国土,北到极地附近的新地岛,南到中亚的哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、乌克兰及西部的波罗的海沿岸的立陶宛和白俄罗斯。根据在中亚等地区已知的400多个水文站上的对比试验,总结和研制出了一套正反演数学模型、计算机处理解释程序和水文地质解释方法,这一成果居世界领先水平。与此同时,在澳大利亚、以色列等国家(地区)先后进行的试验,也证明了地面核磁共振方法是目前世界上唯一的可直接找水的地球物理新方法。

1992年俄罗斯的核磁共振层析找水仪在法国进行了成功演示。两年后法国地调局(BRGM)的IRIS公司购买了该仪器的专利,并与原研制单位ICKC合作,着手研制新型的核磁共振找水仪—核磁感应系统(NUMIS)。法国在1996年春推出商品型NMR找水仪,并生产出6套NUMIS系统。法国IRIS公司研制的NUMIS系统是在俄罗斯Hydroscope的基础上改进的。到目前为止,拥有NUMIS系统的国家除俄罗斯和法国外,还有中国和德国。1999年IRIS公司将NUMIS系统(勘探深度为100m)升级为NUMIS⁺(勘探深度为150m)。拥有NUMIS⁺系统的国家有法国、中国、毛里塔尼亚和伊朗。

1997年底中国地质大学(武汉)引进了法国IRIS公司研制的NUMIS系统。这是我国引进的第一套NUMIS系统。1999年中国地质科学院水环所、新疆水利

厅石油供水办公室各引进一套 NUMIS。2001 年春天水利部牧区水利科学研究所引进一套 NUMIS 系统的升级找水设备 NUMIS⁺。上述单位利用 NMR 找水方法在湖北、湖南、河北、福建、内蒙古、新疆等 11 个省市和地区进行了找水实践，并找到了地下水。研究成果填补了我国用 NMR 技术直接找水的空白，使我国跃居使用该技术找水的世界先进国家行列。

2. 核磁共振找水方法的原理及特点

2.1 核磁共振找水的原理

核磁共振是原子核的一种物理现象，指具有核子顺磁性的物质选择性地吸收电磁能量。氢核是地层中具有核子顺磁性物质中丰度最高、磁旋比最大的核子。除油层、气层外，水（H₂O）中的氢核是地层中氢核的主体。核磁共振找水方法就是通过测量地层水中的氢核来直接找水。

当施加一个与地磁场（B₀）方向不同的外磁场（B₁）时，氢核磁矩将偏离地磁场方向，一旦 B₁ 消失，氢核将绕 B₀ 旋进，其磁矩方向恢复到地磁场方向（图 1）。设旋进频率（拉摩尔圆频率）为 ω_0 ，氢核的磁旋比为 γ ，则：

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

通过施加具有拉摩尔圆频率的外磁场，再测量氢核的共振讯号，便可实现核磁共振测量。

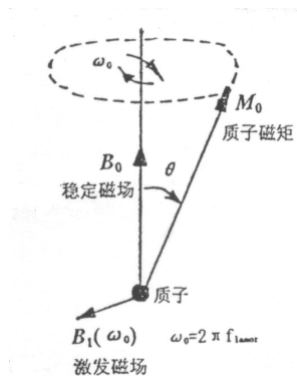


图 1 质子磁矩在磁场作用下的旋进运动

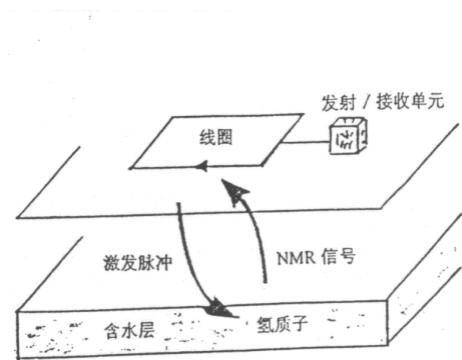


图 2 地面 NMR 找水方法原理示意图

在 NMR 找水方法中，通常向铺在地面上的线圈（发射/接收线圈，见图 2）中供入频率为拉摩尔频率的交变电流脉冲，交变电流脉冲的包络线为矩形（见图 3a）。在地中交变电流形成的交变磁场激发下，使地下水中氢核形成宏观磁矩。

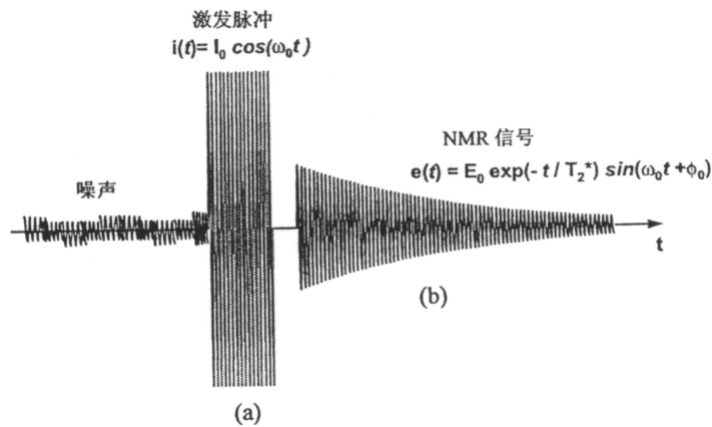


图 3 激发脉冲和 NMR 信号图

这一宏观磁矩在地磁场中产生旋进运动，其旋进频率为氢核所特有。在切断激发电流脉冲后，用同一线圈拾取由不同激发脉冲矩激发产生的 NMR 信号，该信号的包络线呈指数规律衰减（见图 3b）。NMR 信号强弱或衰减快慢与水中质子的数量有直接关系，即 NMR 信号的幅值与所探测空间内自由水含量成正比，这就是核磁共振找水方法的原理。

2.2 核磁共振找水方法的特点

2.2.1 NMR 找水仪是由 PC 机控制输出功率和接收灵敏度均较高的直接探测仪

目前，世界上有两种类型的 NMR 找水仪：前苏联研制、俄罗斯仍在使用的 NMR 找水仪（hydroscope）和法国与俄罗斯合作研制、由法国 IRIS 公司生产的 NUMIS 和 NUMIS⁺。NUMIS 系统是 hydroscope 的改进型，二者的原理没有差异，但 NUMIS 系统在制造工艺和抗干扰能力方面有所提高。商品型 NUMIS 系统于 1996 年春问世，在探查地下水方面效果显著，但其勘探深度仅在 100m 左右，且整个系统重量达 300kg。为了加大勘探深度和使仪器轻便化，在 NUMIS 的基础上升级的 NUMIS⁺除了具有 NUMIS 的全部功能外，还是一套具有更大发射功率（瞬时最大输出功率为 450A、4000V）的模块式找水设备。该设备每个部分的重量都在 25 公斤以内，便于一个人搬运。NUMIS 和 NUMIS⁺均是输出功率高（瞬时最大输出分别为：300A、3000V；450A、4000V）、接收灵敏度高（接受纳伏级信号）并由 PC 机控制的直接探测地下水的仪器。

2.2.2 直接找水

在传统的物探找水方法中，电法勘探在地下水勘查中几乎承担了 80% 的工作量，成为配合水文地质工作的主要手段。与间接找水的电阻率垂向电测深（VES）

相比，NMR 方法具有如下优点：首先，NMR 找水方法的原理决定了该方法能够直接找水，特别是找淡水。在该方法的探测深度范围内，只要地层中有自由水存在，就有 NMR 信号响应，反之则没有响应；其次，NMR 方法受地质因素影响小。这些优点可用来区分间接找水的电阻率法和电磁测深法卡尼亚视电阻率的异常性质。例如，在岩溶发育区，特别是在西南岩溶石山缺水地区，当溶洞、裂隙被泥质充填或含水时，视电阻率均显示为低阻异常，是泥是水难以区分。NMR 测深不受泥质充填物干扰，很容易将二者区分开来。此外，在淡水电阻率与其赋存空间介质的电阻率无明显差异的情况下，电阻率法找水就显得无能为力，而 NMR 测深却能够直接探测出淡水的存在。NMR 方法采用测深方式，通过改变激发脉冲矩 q ，实现不同深度的测量。

$$q = I_0 t$$

式中 I_0 为脉冲电流的幅值， t 为脉冲电流的持续时间。

NMR 找水方法测量的参数有 E_0 、 T_2^* 、 ρ_0 。该方法能直接找水，主要是因为这些参数的变化能直接反映地下含水层的赋存状态和特征。

NMR 信号初始振幅 E_0 。 E_0 值的大小与含水层的含水量成正比，随 q 值变化形成测深曲线，通常用 $E_0 \sim q$ 曲线（见图 4）表示。对该曲线（原始资料）进行解释后就得到该测深点探测范围内的水文地质参数，包括含水层的深度、厚度和单位体积的含水量。

NMR 信号平均衰减时间 T_2^* 。NMR 信号平均衰减时间用 T_2^* 表示，单位为毫秒（ms）。每个激发脉冲矩 q 均可以得到一条 E_0 随时间按指数规律衰减的 $E_0 \sim t$ 曲线（见图 3b 和图 5），由此曲线

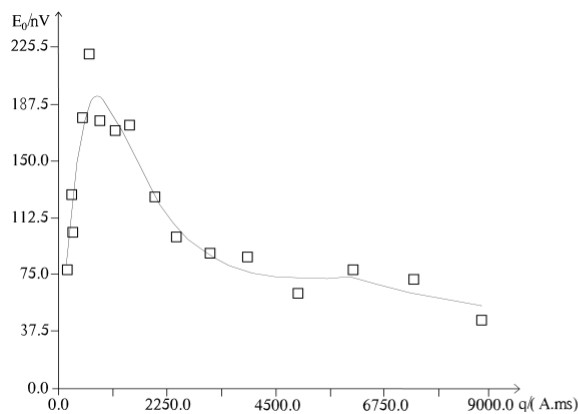


图 4 NMR 信号的 $E_0 - q$ 曲线

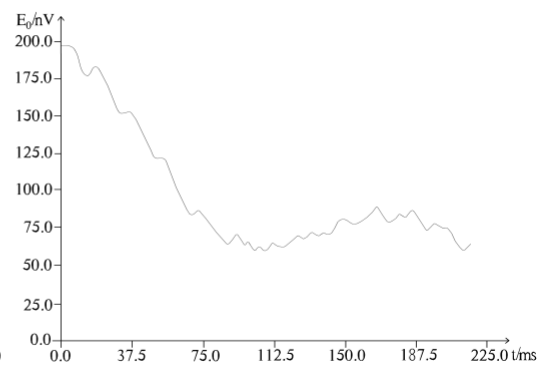


图 5 NMR 信号的 $E_0 - t$ 曲线

可以求出该 q 值探测深度内含水层的 T_2^* 。 T_2^* 值的大小可反映含水层类型（平均孔隙度）的信息。 T_2^* 的计算公式为：

$$T_2^* = \frac{\sum_{m=1}^M E_m^2}{\sum_{m=1}^M \frac{E_m^2}{T_m}}$$

式中 E_m 和 T_m ($m=1, 2, \dots, M$) 分别是某个激发脉冲矩 q_i 在 M 个时刻分别对应的 NMR 信号的振幅值和信号衰减时间。国内外的研究统计规律表明,自由水和束缚水具有不同的 T_2^* 值,自由水的 T_2^* 变化范围在 30ms 至 1000ms 之间。而束缚水的 T_2^* 小于 30ms。由于 NMR 找水仪的电流脉冲的间歇时间是 30ms,因此,NMR 找水仪接收不到束缚水的 NMR 信号。表 1 给出了不同类型含水层的 T_2^* 值。

表 1 实测 T_2^* 值和含水层类型的近似关系

衰减时间 (ms)	含水层类型
<30	砂质粘土层
30 ~ 60	粘土质砂、很细的砂层
60 ~ 120	细砂层
120 ~ 180	中砂层
180 ~ 300	粗砂和砾质砂层
300 ~ 600	砾石沉积
600 ~ 1000	地面水体

NMR 信号初始相位 ϕ_0 。初始相位是天线中激发的电流与测量到的衰减电压之间的相位差。NMR 信号的初始相位反映地下岩石的导电性。

2.2.3 反演解释具有量化的特点,信息量丰富

核磁共振方法可将核磁共振信号解释为某些水文地质参数和含水层的几何参数。在该方法的探测深度范围内,可以给出定量解释结果,确定出含水层的深度、厚度、单位体积含水量(见图 6b),并可提供含水层平均孔隙度的信息。

2.2.4 经济、快速

完成一个核磁共振测深点的费用仅为一个水文地质勘探钻孔费用的十分之一,并可以快速地提供出打井位置及划定找水远景区。NUMIS 系统的探测深度为 100m, NUMIS+系统的探测深度为 150m,它们尚不能用来探测埋藏深度大于 150m 的地下水;此外,由于核磁共振找水仪的接收灵敏度高(可以接收纳伏级的信号),故易受电磁噪声干扰,在电磁噪声干扰强的区段不能开展工作。

3. 应用效果实例

自中国地质大学（武汉）于 1997 年年底引进了中国第一套 NUMIS 以来，已成功地在湖北、湖南、河北、福建、内蒙古、新疆等 9 省区开展了找水实践。

3.1.1 在前人认为是无水区的湖北永安地区找到了优质岩溶水

在南方岩溶石山地区。传统的物探找水方法在上述地区探测岩溶水遇到许多困难，NMR 方法为解决这些困难提供了一种新的技术手段。

湖北永安工区位于岩溶发育区，前人认为是无地下水区。工区大部分为耕植农田，被第四系粘土覆盖。在永安农牧开发区，中国地质大学在指定区段开展了地下水勘查工作。以 NMR 找水方法为主，辅以电阻率法，探查到了优质的岩溶水。图 6 是 12 个 NMR 测深点其中之一的解释结果与钻孔资料对比图，其工作技术参数如表 2。由图 8 的 NMR 含水量直方图可见，工区有两个主要含水层，

表 2 XJJ-3 NMR 测深点的技术参数

天线类型	大方 (75 × 75m ²)
发射频率	2090Hz
脉冲矩个数	16
记录长度	250ms
噪声水平 nV	900 ~ 2020nV
叠加次数	128

第一个含水层位于 23 ~ 42m 的深处，含水层 NMR 信号的平均衰减时间 T2* 为 110ms；第二个含水层位于 75 ~ 100m 以下，其 T2* 为 230ms。这两个含水层的 T2* 值变化表明，深处含水层的平均孔隙度变大，意味着含水岩石更加破碎。实

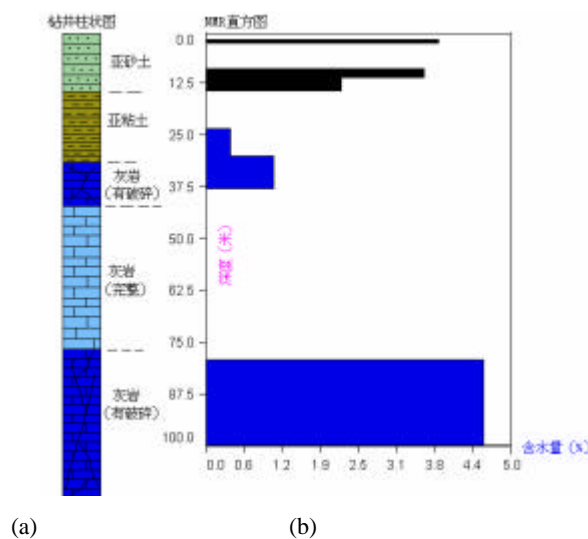


图 6 湖北永安工区 NUMIS 系统勘查岩溶水资料解释结果与钻孔资料对比图

(a) 钻孔岩性柱状图 (b) NMR 测深含水量直方图

际钻探（终孔深度 130m）证实了上述解释。如图 6 中钻孔柱状图所示，本区基岩为灰岩，主要含水层为破碎灰岩层，特别是深部的灰岩溶洞，裂隙发育，富水性强。含水层属碳酸盐岩类岩层，水质很好。三口井日出水量在 5000 吨以上，为农牧业和工业生产以及旅游业提供了充足的水源。

3.1.2 为长江三峡水电站输送电网的变电站解决用水问题

在湖北省变质岩（白云质千糜岩）发育的孝感县某地，用 NMR 方法找到了基岩裂隙水（含水层位于 52~81m），日出水量为 348t。此外，为湖南省红层发育的长沙、益阳地区变电站勘查到了红层裂隙水，日出水量 80 多吨。上述解释结果与钻探结果完全一致，为三峡水电站输送电网的某些变电站提供了生产、生活以及消防用水。

3.1.3 圈定了地下淡水资源远景区

塔河油田位于塔克拉玛干大沙漠北缘，是 20 世纪 80 年代发现并开发的国家石油接替区之一。油田位于塔里木河中下游的渭干河与库车河冲洪积扇的扇缘地带，在洪水季节常有大量的洪水灌入油田，区内地下水的排泄方式主要依赖于高强度的大气蒸发。因此，地下浅部的水井由于氯离子和硫酸根离子含量较高，导致矿化度过高而不宜饮用。供水问题已严重地困扰着油田的发展。

普查工地位于塔克拉玛干大沙漠北缘。在第四系的粉细砂与薄层亚砂土、亚粘土的互层中探测到了低矿化度的含淡水岩体。本区影响含水地层电阻率变化的主要因素是地下水矿化度的高低。在其它条件不变的情况下，地下水矿化度高则含水地层的电阻率低，矿化度低则含水地层的电阻率高。前人工作的资料及中国地质大学实测资料表明：工区地表干燥砂层电阻率高，含咸水地层电阻率低（ $0.55 \sim 2 \cdot m$ ），含淡水地层电阻率为 $n \times 10 \cdot m$ 。不同岩性特征与其电阻率变化的关系为电法勘探找水提供了物性前提，也为资料解释提供了依据。根据普查低矿化度淡水资源的要求和工区的地质、地球物理条件，先后使用了瞬变电磁测深（TEM-67）、地面核磁共振测深（NUMIS）、频率电磁测深（EH-4）和 VES 等四种找水方法。通过对比研究四种找水方法的地球物理场异常特征，从理论上肯定了塔河油田存在地下淡水资源的可能性，并得出了塔河油田存在地下淡水资源的结论，圈定了淡水远景区。

通过在新疆的找水实践和理论研究，总结并提出了在新疆沙漠地区找水的物探方法的优化组合系列。其中，在探查 100m 深度范围内的地下水时，NMR 测深（NUMIS）作为首选方法，NUMIS 与 TEM（或 VES）组合是最佳组合。在 TEM、EH-4、VES、NMR 测深资料对比过程中，NMR 测深划分含水层的分辨能力最强。此外，还

用 NMR 测深资料区分了视电阻率的异常性质,即区分出岩性变化引起的视电阻率异常,提高了反演结果的唯一性。NMR 测深的量化程度高,可以提供各含水层的深度、厚度和单位体积含水量,以及各含水层的平均孔隙度等信息,这是其他物探找水方法所不能比拟的。在塔河油田地下水普查工作中,100m 勘探深度的 NUMIS 系统能够探测到本区含淡水岩组的顶板深度(几十米),可准确确定本区淡水层的顶板和隔水层位置,为成井工艺和储量计算提供了十分有用的信息,可以大大减少打浅钻的工作量,进而节约经费。到目前为止,由西北石油局在圈定的淡水远景区内完钻 3 口水源井,出水量稳定,且水质良好(矿化度 < 1 克/升),均达到国家一级饮用水标准。

3.1.4 在内蒙古开展了找水工作

自 2001 年春天引进 NUMIS⁺以来,已在内蒙古牧区完成了 300 多个 NMR 测深点,为牧民解决防氟改水、应急用水问题,已有 40~50 口井出水。图 6 是水利部牧区水利科学研究所于 2002 年 5 月 20 日在内蒙古牧区某地一个 NUMIS⁺测深点

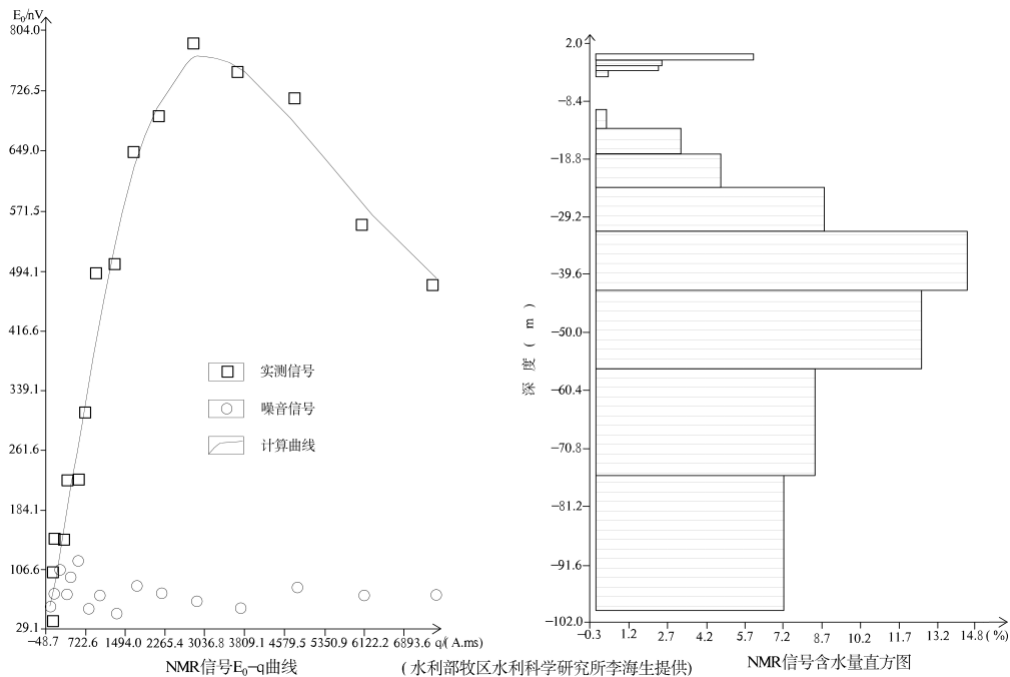


图 6 内蒙古牧区某地一个 NUMIS⁺测深点的资料解释结果

的资料解释结果(发射/接收天线为边长 100m 的大方形)。工区地处沙漠区,电磁噪声干扰小,小于 100 nV, NMR 信号的初始振幅随激发脉冲矩变化的 $E_0 \sim q$ 曲线具有含水特征,其实测的最大值接近 800 nV。实测曲线与计算曲线拟合较好。解译结果表明,地下 12m 以下均有含水层显示,含水层衰减时间在 30~300ms 之间变化,其中 20~40m 深度段含水层颗粒较大,含水体属粗砂或砾质砂类岩层。自该层向下含水层颗粒逐渐变小,含水体为中细砂或粘土质砂。由于该工区干扰

小，信噪比高，水量丰富，接收到的 NMR 信号频率变化稳定，因此，观测质量可靠。上述结果已被用户采用。

3.2 国外的应用情况

在国外的探查地下水工作中，NUMIS 和 NUMIS⁺在干旱缺水区、沙漠区、解决应急水源地问题、水文地质填图和专用水源地，以及评价其他物探找水方法异常性质等方面得到了广泛应用。

3.2.1 俄罗斯已将 NMR 测深作为常规的物探找水方法

早在 20 世纪 80 年代中期，前苏联科学家们用自制的 NMR 找水仪 (Hydroscope) 在哈萨克斯坦缺水地区开展了地下水探查工作。他们用一台找水仪在 3 周时间内调查了 100 平方公里的干旱区，探查出一条淡水抽取带，指明了最有远景的钻孔位置，同时提供了导水系数等水文地质信息，后得到找水实践的证实。

3.2.2 在美国南加利福尼亚沙漠区探查到砂岩裂隙水

据法国 IRIS 公司的技术资料，为了评价 NUMIS 系统探测深部含水层效果，在南加利福尼亚沙漠进行了一次野外试验。试验采集的原始数据和反演解释结果表明，在脉冲矩较大时（对应于深部地层），NMR 信号增大；确信在约 100 m 深处有地下水存在；破碎砂岩含水层的含水量约为 20%；NMR 信号的衰减时间短（40ms），表示含水岩石颗粒为细到中等大小，这些与已知地质资料吻合得很好。

3.2.3 使用 NUMIS⁺在沙漠发育的毛里塔尼亚探查地下水

使用 NUMIS⁺在沙漠发育的毛里塔尼亚探查地下水，NMR 测深结果的 $E_0 \sim q$ 曲线显示具有明显的含水特征， $E_{0\max}=420$ 纳伏。由此可知含水层水量丰富。由含水量直方图 7 可见地下 36~120 m 深处均有含水层显示，砂层单位体积含水量为 13~26%， T_2 值显示上部含水层颗粒较大，为中粗砂，下部含水层颗粒较小，为细砂。本沙漠区干扰小，电磁噪声小而平稳，仅为 50 nV 左右，因此测量结果可信度高。上述结果已被钻探结果证实。

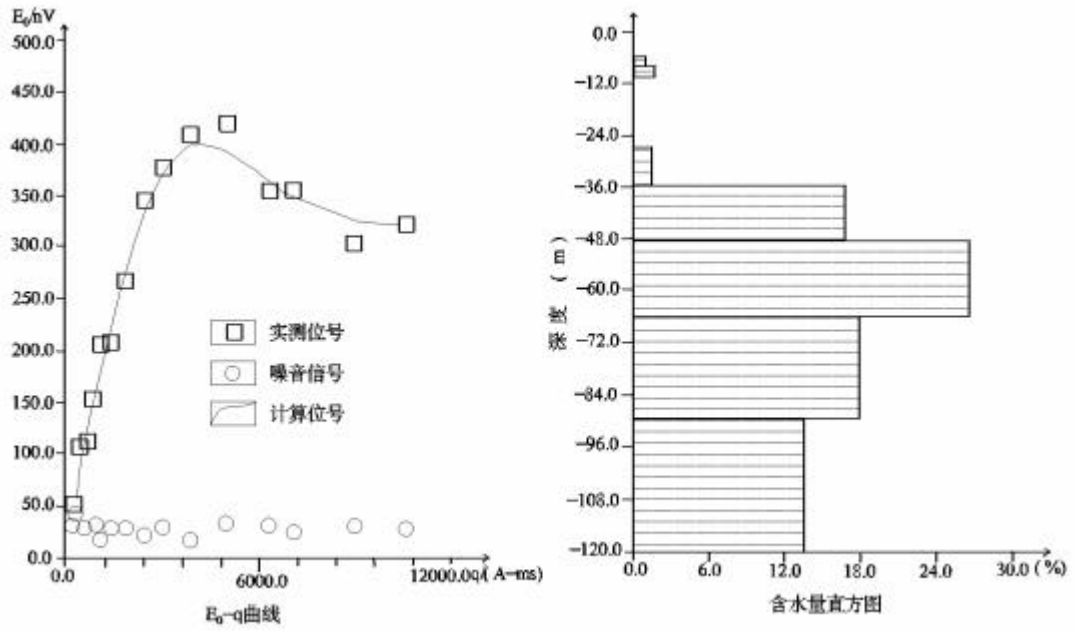


图7 NUMIS⁺在毛里塔尼亚脑阿克乔特市的应用情况

4. 建议

鉴于我国找水任务工作量大,引进仪器费用昂贵(NUMIS 为 63 万法郎 ,NUMIS⁺ 为 83 万法郎), 建议自行研制这种类型仪器, 以便推广。