

国外水文物探技术的新进展

何雪洲 葛秀珍

(中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所)

由于物探技术能提供多种描述地质材料的物理参数并具有速度快、成本低和不破坏地质环境的优点,在水文勘查的历史上已经得到了广泛的应用。近年来,水文物探取得的主要进步有以下两个方面,一是开发成功核磁共振找水仪器和技术并在世界范围内取得较好的应用效果,它标志着物探技术已开始从间接找水向直接找水过渡,是一次技术上的飞跃;二是物探技术的应用已从单一的找水、定井扩大到为地下水管理提供资料。在试验和应用研究中,逐步形成了一批新的技术方法。

水文物探技术和应用的范围较广,长期以来国内刊物(或书籍)已对国外有关的发展做过一些介绍。为避免重复,本文介绍的重点将置于 1999 年后地震、电法、探地雷达发展的某些主要技术动态。

1. 地震勘探技术

地震方法是目前我国用于水文地质调查的主要物探方法。它通过研究人工激发和接收的地震波的运动学和动力学特征来调查地质问题。地震勘探的方法有近十种,以下仅对主要的方法—反射地震、折射地震、垂直地震剖面、三维地震予以介绍。

1.1 反射地震

目前,反射地震是浅层勘查中得到最多应用的地震方法。虽然 80 年代它才在水工环地质调查中得到应用,但是在 90 年代初却已经形成比较完整的浅层反射地震技术系列。

1.1.1 资料采集技术的改进

(1) 地震共中心点迭加(CMP)的野外资料采集中,需要大量的劳力埋置检波器。为了提高效率,降低成本,国外研究出了一种陆地检波器拖缆,使用万向接头,可以自动确定方向。在瑞士两个试验场地的应用成果说明,该设备在技术上解决了检波器与大地间的藕合问题,只二、三人作业,即可完成过去 10 余人的工作,并且能取得与原来一样好的效果。

(2) 九分量地震数据

地震行业正在考虑应该记录多少数据分量才能以最低的价格提供地质目标

体信息。为了取得地下目标的最佳图像，必须首先把地震波分离成几个分量，以便使 P 波、Sv 和 Sh 波三种图像中的任何一个，尽量少受其它两个波形的影响。可以根据 P、Sh 和 Sv 波速度的差异分离波场；但是，利用 P、Sh 和 Sv 波质点位移矢量的差别分离波场更有效。将后一种分离波场的方法称做为“地震矢量波场成像”。

每个质点位移矢量（P、Sh 和 Sv 波）都以不同方式反映了岩石的性质，因此也就提供了有关岩石系统、孔隙流体和地下目标的不同信息。若在野外使用三分量检波器分别纪录下三种波场，结果就得到九分量（9C）地震数据。通过进一步开发 P、Sh 和 Sv 波的成像技术，就可以得到有关地下地质、地层关系、岩性分布和孔隙流体性质的更多信息。

1.1.2 资料处理技术研究

（1）地震偏移技术

地震偏移技术是地震资料处理的一种重要技术，它的提出和应用已经有二十多年的历史。早期的主要偏移方法有基尔霍夫偏移、F—K 偏移和有限差分法偏移。时至今日，以提高空间正确归位为目标的地震偏移技术已经取得了长足的发展。作为提高空间分辨能力的主要手段，就要采用特定的方法实现反射界面正确的空间归位，即是要实现地震剖面上同相轴与实际反射面在位置、长度和倾角等方面的一致性。实现这一目标的技术关键是要确保能够实现地震记录上的共反射点道集记录的同相迭加（首先要求取得合理偏移速度）。目前，常用的偏移技术有二维迭前深度偏移和三维迭后时间偏移等。

根据不同的地质条件，选择适当的偏移方法能取得较好的效果。一般来说，简单地层情况应选用迭后时间偏移；上覆地层横向速度变化大，应选择深度偏移；出现倾斜同相轴交叉及与复杂表层构造有关的非双曲线时距曲线同相轴，应选择迭前偏移；二维偏移不能消除明显的空间效应，应利用三维偏移。

（2）地震资料处理技术的发展

20 世纪 60 年代地震技术的重大突破，是采用共中心点(CMP)方法有关的多次覆盖反射剖面在反射成像和反演方面取得的成功。该技术的目标是从相关和非相关（多次波）干扰最小的多次覆盖数据模拟一次反射波的零偏移距剖面。通常将这样模拟的零偏移距剖面称作 CMP 叠加剖面。它的结构包括按一种“宏观 - 速度 - 模型 - 独立”方法运行的、以相关性为基础的正常时差(NMO)速度分析。NMO 速度（也被称作 CMP 迭加速度）不但可以用于构组最佳的 CMP 迭加剖面，而且可以用于确定当今被称做宏观速度的模型。

另一个对地震技术具有重要影响的是引入“宏观 - 速度 - 模型 - 独立”的倾角时差 (DMO) 算子, 它可用于改进从地震多次覆盖反射资料模拟零偏移距剖面。由此可产生“NMO/DMO/迭加剖面”零偏移剖面的模拟。NMO/DMO/迭加的大多数应用成果 (通常假设为一维的) 被认为是它对宏观速度模拟不敏感所致。利用这样简单的假设使 NMO/DMO/迭加剖面易发生畸变, 必然造成横向较强的非均匀性。

大多数的地震工作者考虑使用 (特别是在横向非均匀条件下) 宏观速度来模拟零偏移剖面, 这样做不但非常困难, 而且也不自然。实际上, 可以设计出多种新型的零偏移模拟, 并且能完全成功地得到实现。它们与过去传统的 CMP 迭加相似, 在某种意义上, 它们完全是按“宏观 - 模型 - 独立”的和专用的“以时差和相关性为基础”的方法在运行。

1999 年在德国召开的“宏观模型独立的地震剖面图像”专题讨论会上, 提出了以宏观 - 模型 - 独立的反射图像为基础的技术战略思想, 一些作者指出, 在二维横向非均匀沉积盆地 (近地表地层速度稳定) 内, 利用在分析空间时差路线 (或多次覆盖反射资料中的时差面) 中使用的某些系统的相关分析, 完全可以自动地得到多达三种可用的“运动波场特征”。时差路线 (或面) 的这三种运动特征不但能帮助确定最佳迭加面和路线, 而且还能直接得到良好模拟的宏观 - 速度 - 模型 - 独立的零偏移剖面。它们还能为随后的反演或深度偏移确定宏观速度模型和其它地质特征。这里须指出的是, 该专题讨论会论文虽然只处理二维问题, 但是没有将理论推广到三维的限制, 可以从三维地震多次覆盖反射资料确定 8 个运动波场特征。

目前, 地震学术界对该专题讨论会上研究的问题知之甚少, 而将主要注意力集中在迭前和迭后偏移处理上。该会议的资料将为地震研究和应用提供一个令人神往的资料处理、成像和反演方法。

1.1.3 仪器发展趋势

20 世纪 80 年代, 发达国家浅层地震仪器的道数只有 24 道或更少; 仪器动态范围通常为 60db 或更少; 另外, 只能同时对一、二组同相轴成像, 只记录单分量信息, 并且通常只能用一种方式分析纵波。目前, 仪器有了较大地发展, 如 2000 年 Schlumber 公司宣布, 开发成功 Q—Land (陆上 Q 技术) 系统。该系统的第一个特点是记录单个检波器 (而不是传统的组合检波器) 接收地表波场, 具有 30000 个数据道的采集能力 (是以前通用系统的 10 倍)。Q—Land 包括能用于上述这样多数据的硬件和能改进多个检波器信号实时处理的资料处理软

件。该系统的另一个特点是具有对多个单数据道进行灵活的数字组合成型（DGF）。因此，Q—Land 系统克服了常规地震采集中大量线状或面状分布检波器组合造成的波数响应；提高时空域内分辨率、获取更强的信号及压制干扰的效果。Q—Land 系统适合后勤供应困难、信噪比较差、地滚波干扰严重、有静电干扰和地形起伏大的地区使用。该系统还可以用于诸如三维多分量地震、高分辨率成像等特殊情况。

1.2 折射地震

折射地震是最早用于水工环地质调查的地震方法。由于野外施工需要大排列和强震源以及自身的灵敏度和分辨率不高等技术缺点，其应用的主导地位已逐渐被反射地震法取代。目前，对传统方法的改革和创新也有了一些起色。折射地震仍不失为一种主要的物探方法。

1.3 垂直地震剖面

垂直地震剖面（VSP）技术是前苏联在 20 世纪 70 年代首先研究成功的一项技术，后来为世界地球物理学界采用。在地质复杂地区，记录垂直地震剖面可提供钻孔外的详细、高分辨率图像。新一代的井下排列，可提供高保真度四分量数据。目前，VSP 的应用已经不局限于提供地震波速度和标定层位，而是可以以钻孔为中心，沿地面呈放射状布置放炮，进行面积三维 VSP 观测。采用高分辨率处理 VSP 资料，其分辨率可达到米级。应用多波 VSP 获得的横波资料可对地层的各向异性和裂隙分布进行评估。研究开发出了利用钻头振动为震源的随钻 VSP 技术，可对钻井进行动态监测和对钻头下方地层预测。

1.4 瑞雷波勘探

面波是沿介质自由表面传播，波动现象集中在一个波长范围内的另一类弹性波，研究表明，瑞雷波是由 P 波和 SH 波干涉生成的表面波，而乐夫波是 SH 波的多次反射波在界面干涉生成的表面波，近十年来，对瑞雷波的研究有了长足发展，并在实际勘探中应用广泛的一种新的物探方法，瑞雷波勘探是利用人工或机械震源产生所需频率范围的瞬态激励，通过测量不同频率瑞雷波的传播速度来探测不同深度的岩土介质性质。瑞雷波特性为：在分层介质中传播的瑞雷波具有明显的频散特性；瑞雷波的波长不同，其穿透深度也不同；瑞雷波传播速度与横波传播速度的相关性。

利用瑞雷波的前两种特性，可以调查介质的物性变化，对沉积地层进行物性分层，探查地下空洞和掩埋物体；利用后一特性可以得到岩土层横波速度、密度等参数，进而计算出介质的其他物理力学参数，近年来广泛用于水文、工程地质

及地质灾害勘察中,例如,洞穴、掩埋物、堤坝隐患探测,公路、机场跑道检测,地基土分层、地基处理效果评价等。

瑞雷波勘探虽然只有短短几十年时间,但该方法以其设备轻便、资料直观、浅层分辨率高,应用范围广、方便、快速等优点,已引起科研、生产部门的高度重视。随着该方法理论和应用研究的不断深入,除单独应用瑞雷波速外,瑞雷波的衰减特性、椭圆率的变化等各种信息的综合利用,必将开拓瑞雷波勘探更加广泛的应用领域。

1.5 三维(3D)地震

过去十年中,浅层高分辨率地震已逐渐成为浅层勘查的重要工具。虽然单独利用 2D 资料也可以对简单连续地质特征填图,但是提供复杂反射体的大小和形状就比较困难。从近年国外推出的 3D 地震勘探的实例可以看到,3D 资料具有这方面能力。现将有关的主要技术简介如下。

在规划 3D 地震勘探时,要准确定义勘查的主要目标。预计目标的最大和最小深度,横向范围要求的空间分辨率,探测线、深部特征所需的最少迭加次数;最浅目标成图所需的炮-检距,浅、深部反射速度可靠分析所需要的最大偏移距和方位角范围;尽力收集目标区的地质及以往的地震资料(如最佳震源能量和频率,检波器的大地藕合特征等)。

因为三维地震的复杂性及采集资料的数量巨大,所以不管其勘探规模如何,事前均需做以计算机为基础的设计。三维勘查的几何结构模拟使分配关键参数(如迭加次数,最大最小偏移、在单个 CMP 面积元内分配方位角和偏移距等)成为可能。

根据设计的要求确定勘查参数。Frank Buker 等在 3D 地震试验中推荐了一种选择勘查参数的方法,选择的内容包括检波距、炮点距、CMP 面积元、平均覆盖次数、每一面元中小于 20m 偏移距的道数和方位角。

资料采集方式。三维地震资料的采集方式根据对实施项目的估计来设计,一般包括互相平行的数条接受测线,检波器道数及间隔和线距根据估算确定;另外,需布置与接收线垂直,并互相平行的震源线。然后利用设置的检波器网接收每一震源的信号。为了使大多数的 CMP 面积元内有较多的小偏移距的纪录道,并能够对极浅地层做可靠的成像和确定均方根速度, Frank 等在最近试验中,在上述主采方式的基础上,又布置了第二采集方式予以补充。

目前的解释还未摆脱二维资料解释的局限,存在着以下一些不足。比如在解释中,虽然引进了人机联作交互技术,但以系列密集垂直剖面 and 水平等时切片联

合解释为基础的工作方法不能克服在断层组合上存在多解性、难于确定一些特殊异常体位置的缺点

1.6 三维地震资料的可视化技术

三维地震的成果是经过三维偏移处理的地震数据体平面上按 M 网格排列分布，在垂向上按深度换算的时间采样组成立体数据网格。偏移之后的数据体是一个完整的、基本上真实地反映了地下地质体时空变化的三位数据体，由此数据体可以输出任意间距的垂直剖面、水平切片、制作电影胶片和立体图等。三维地震数据体可视化技术是一种地震解释技术。它通过对地震数据应用不同透明度，在三维空间内实现对地下的地震反射率做直接评估。这种解释技术及其基本原理与传统的解释方法截然不同。

可视化包括基于平面图和基于立体图的两种基本类型。立体可视化以数据体一种完全不同的属性（透明度）为基础，假设地下界面的反射率是地下界面的三维现场模型（实质上由三维空间中的构造、地层及振幅特性综合而成）。无论做特定前景目标评价还是做三维区域分析都可以通过这种“透视”方式来完成。与平面可视化以层面构成三维模型不同，立体可视化以数据体本身构成三维模型。

基于三维像素的立体可视化中，将每一个数据样点转换成为一个三维像素（其大小近似面元间距和采样间隔的三维像素）。每一个三维像素具有一个与原三维数据母体相对应的数值、一个红色（红、绿、蓝）值以及一个暗度变量，该变量有助于调整透明度。因此，每个地震道就被转换成为一个三维像素柱。数据按比例分为 8 位并显示三维像素值的分布。在做详细的可视化之前，应该先检查一下诸如相位、频率及地震信号特征的数据参数。这对于指导应用透明度及针对特殊解释问题设计可视化方案，都非常重要。

这里需要再次提醒物探人员的是，将常规解释思路和工作流程用于立体可视化会产生“陷阱”和不标准的结果。克服困难的方法是对立体可视化有一个完整的了解。

1.7 俄罗斯和乌克兰等国地震勘查技术的进展

1.7.1 重视新技术和新设备的开发利用并积极发挥电法和重力等方法的作用。

为适应复杂勘探要求和提高勘探效益，地震队以三维地震技术作为基本勘探手段，已用 408ULSN388，I/Osystem Two 等类型的千道以上的新型遥测数字地震仪取代过去的采集装备。物探数据的处理与解释上广泛采用当前世界流行

的计算机和 workstation 系统。特别需要指出的是，俄罗斯等国长期以来坚持非地震勘探技术（特别是电磁法和重力）在解决复杂、细致的油气勘探地质任务中有用武之地的观点。在有关的基础理论、应用技术和新型装备的研究开发方面进行了大量的工作。许多具有成本低、分辨率高的电法、重力等新技术方法，作为地震勘探技术的重要补充手段，在油气勘探中的应用增长很快，并显示出成效。

1.7.2 多波地震勘探技术

综合应用地震纵波、横波及转换波所提供的与目的层相关的地质特性信息对寻找复杂的隐蔽性圈闭、构造有十分重要的意义。当前，多波地震勘探工作主要是采用多波采集的 VSP 资料。并由此推广到地面多波地震测量。直接应用横波能更好的反映诸如海相地层中的礁体及地层的各向异性特征。特别是对利用横波分裂产生的快、慢横波分析，可以研究地层内的裂隙密度及其分布状态。可确定岩层的孔隙度和渗透率，对其含油气性进行预测。

目前，俄罗斯已研制出专门用于激发横波的大功率可控震源，以及使用炸药在炮井中激发横波的采集技术。在西伯利亚地区，通过对多波地震资料研究，成功地查出灰岩的裂隙分布，从而找到一些裂隙型油气藏。

1.7.3 地震数据的处理与解释技术

乌克兰国家科学院地球物理研究所开发了具有较好应用效果的地震资料处理自动剩余校正的软件“RUSTX”。全俄地球物理勘探方法研究所开发了用于三维或二维地震资料处理、解释软件包——“INTERSYS”系统。与当前流行的西方国家开发的三维地震勘探数据处理软件不同之处在于：通常流行的软件是针对典型构造的三维地震测量数据进行处理和解释；而该系统则是针对复杂地震条件，在地质构造和存在速度横向变化的区域内获取精确的地震解释成果，为勘探井的部署提供可靠依据。它可进行三维或二维迭前深度偏移及迭后深度偏移；基于迭前偏移算法的偏移速度分析；在迭加数据的数据体中进行剩余校正；地震数据体及所研究介质模型的形象化显示等多项功能组合。

2. 电法勘查

不管是在 20 多年前单纯找水勘查年代还是在目前提倡合理利用地下水资源保护环境的时期，电法一直是水工环调查的一种重要方法。近年来电法仪器和技术方法发展比较活跃。电法仪器比较成功地移植了地震仪器成熟的经验技术，主要的技术指标（如动态范围、采样间隔、模数转换等）几乎与地震没有什么差别；地震的采集道数可达 1000（有的达到了 10000）道，目前电法仪器可

多为 240 道,并且 1024 道在技术也是可行的。但是,电法勘查具有轻便、多道、通过卫星同步、遥测等功能。电法可用于探测盖层厚度、断层裂隙、岩石单元、海水入侵等。由于电法种类繁多,下面仅就国外近年来实用的几种仪器和技术介绍如下。

2.1 瞬变电磁法(TEM)

它利用接地电极或不接地回线通以脉冲电流,在地下建立起一次脉冲磁场。在一次场的激励下,地质体将产生涡流,其大小与地质体的电特性有关。在一次磁场间歇期间,该涡流将逐渐消失并在衰减过程中,产生一个衰减的二次感应电磁场。通过设备将二次场的变化接收下来,经过处理、解释可以得到与断裂带、采矿中的陷落柱及其它与水有关的地质资料。常规物探方法受环境限制大,难于开展水上作业。瞬变电磁法则受环境影响较小,可以用于水上作业。

数字技术的发展促进了一批 TEM 仪器的出现(如 Geonics PROTEM47, Sirotek MK3, Zonge Nano TEM, Bison TD 2000 等),它们对 10-200m 浅层具有较高的探测能力。另外,还开发出 TEM 资料的处理新技术,有可能在事前没有较多可用地下资料的情况下,制作逼真的解释模型。

2.2 EH-4 电磁法成像系统及其应用

EH-4 电磁成像系统是一套电磁信号自动采集和处理系统,由美国 EMI 和 Geometrics 公司联合开发生产。该仪器将可控源音频大地电磁法(CSAMT)和大地电磁法的两种仪器有机地结合起来,实现 10Hz-100kHz 范围内信号的连续采集。该系统轻便灵活,分辨率高,不受高阻盖层的影响,可以用于单点和连续剖面测量。完成各测点测量后,可获得视电阻率、相位、相关度、一维反演等资料;在现场取得三个以上连续测点资料时可以提供拟二维反演成果。EH-4 系统可用于水文地质、工程地质调查及基岩填图等领域。

2.3 仪器系统朝多用化和轻便化的方向发展

近十年来,电磁法仪器系统发展很快。一机多能是现代地面电磁系统的一大特点。

凤凰公司推出的 V5—2000 系统,使该系统可用于高精度三维 MT 勘查。该系统能与 GPS 同步,各测站之间相互独立。通过分布在勘查区内多个远参考点建立起来全区统一的电磁场,对地形影响和静态位移等的处理都能收到较好的效果。

在有源场电磁法仪器的开发方面,俄罗斯研制成功一种建场测深法仪器(TEM),得益于强大的人工场源,采集资料的质量得到了很大的提高,勘查的精

度和解决问题的能力在多种电法仪器中位于前列。

Zonge 公司研制成功 GDP— 多道接收系统,可采集可控源和天然源地电数据.该系统的特点是可以进行遥控测量、宽带记录 TEM、CSAMT 以及 IP 波形的时间序列。

为适应电法从单一的供水勘查向合理利用地下水资源和环境保护战略方向的转变,国外开发了一批小型、轻便、可快捷使用的电磁法仪器。这些仪器在长期的应用中取得了好的效果。下面就 Geonics 公司生产的 EM31、EM34 仪器作一简单介绍。

EM31 是一种电磁感应仪器。支撑该仪器系列的是公司一项获得专利的电磁感应技术。正是这项技术,使该仪器不需要电极!仪器构形很简单(以 EM31—MK2 仪器为例),将数据记录器插入控制悬臂内,仪器重量只 12.5Kg,工作时只需一人将仪器悬在胯部,在行进途中就可以完成大地电导率和同相分量的测量。仪器适应在大多数地质条件下使用(包括诸如砂砾和沥青高阻条件)。该仪器已经被有效地用于地质变化、地下水污染或任何与大地电导率变化有关的地下特征填图。仪器的勘查深度约 6 m,具有比传统电阻率法快的优点,所以也适用于农业生态环境的大面积调查,比如将 EM31—MK2 仪器与探地雷达配合,用于探测农业土壤特征,确定农用化肥的离场流动。

EM34 与 EM31 仪器主要不同之点在于它可以提供几个深度的地质资料。最大深度可达 60m;两人操作。适用于埋深较大的地下水污染羽状流填图和地下水勘查。在垂直偶极情况下,EM34—3 对垂直地质异常特别敏感,广泛用于裂隙、断层和基岩风化带的地下水调查。

3. 探地雷达(GPR)

GPR 的试验研究应用已经有了 90 多年的历史,但是直到 20 世纪 70 年代美国 GSSI 公司才第一次研制成功 SIR 探地雷达系列,并取得一批实用成果。由于 GPR 技术具有其它物探方法无与伦比的浅层高分辨率特点,近 30 年来该项技术已取得长足的发展。仪器不断更新换代,资料采集、处理、显示和解释技术不断革新,20 世纪末期,GPR 的应用领域已从工程建筑迅速扩展到地下水以及微观地质环境调查方面,成为现代地质调查中的一种重要工具。

3.1 资料采集、处理和显示技术

资料采集。早在 20 世纪 90 年代,GPR 仪器已从单点采集资料方式过度到连续采集。在发射/接收天线的组合形式上,一般利用共偏移距法、共中心点法或共震源法采集资料。共偏移距法(发射/接收天线距固定)容易快速地采集野外

资料,适用于低衰减介质地区的大面积调查。共振源法用固定发射天线位置,在两个接收站间按某一间隔采集资料。共振源道集资料可以根据天线位置转换为 CMP 道集。共振源法适宜用于详细确定地下构造的勘查。其中心点 (CMP) 法通常将发射和接收天线对称地置于 CMP 两侧,用不同偏移距采集资料。通常情况下,共中心点法的 CMP 道集资料分析速度比用共振源道集变换成的 CMP 道集的效果好。与共偏移距法比较,共中心点法具有三大优点:a 资料信/噪比高;b 可以估算正常时差速度;c 可使用成像技术,用于提高空间定位精度。

资料处理。高频信号在低电导率介质中传播时,介质中的电流以位移电流为主。在这种前提下,可以用声波方程近似地代替电磁波方程来描述雷达波的传播特征。为了更好地将石油地震的先进资料处理技术,引入 GPR 的资料处理,一些公司间展开合作,通过记录格式的调整,将地震的处理软件直接用于 GPR 资料的处理。除了一般的常规处理外,还研究了同偏移距的偏移处理和迭加资料的迭后偏移处理,三维资料处理。但是许多 GPR 应用研究表明,电磁波在地下传播能量衰减很快,并且常伴有明显的频散现象,这说明声波方程不能恰当地描述 GPR 波,而应该使用含传导电流的麦克斯韦方程。目前,国外已有一些学者按这种新的思路研制新的 GPR 资料处理软件。

显示技术。2D、3D 及 4D 数据的显示技术基本上是沿用地震勘查资料的显示技术。如 Ralf Birken 等在对博登营 4D GPR 资料的显示中,使用的就是 Lamonts 4D 地震小组用的同一软件包。该软件包 (AVS) 运行在以 UNIX 工作站为基础的可视化编程环境中。它使用户可以分析、处理和显示大量复杂数据,包括 2D、3D 图像、3D 制图和多维数值资料。

3.2 4D GPR 调查技术

3.2.1 4D GPR 调查。

4D GPR 调查技术利用多重三维 GPR 资料集监测地下水污染物排泄和迁徙引起的阻抗变化。结合可视化技术,可用于观察污染物在地下迁徙的结果和对场地采取补救措施的有效性。

4D GPR 的原理与 4D 地震的原理相同,即在不同时期重复相同 3D 的勘查。由于在重复勘查期间,地球的固体部分不会发生显著的变化,因此测量间的变化必定是地下液相物质变化的结果。这样就可以根据观测资料的差异和可视化技术,观察到地下液相物质的流动。

3.2.2 获取水力传导系数模型

地球科学中一个最复杂的问题是在地下介质处于非均匀情况下,确定诸如

水流通道、流速或水力传导系数之类的特征。在确定地下水补给区的大小和形状评价、溢出和羽状物的污染影响、以及补救工作的规划和评价中，需要当时及预测的液态流状态的资料。在解决所有这些问题中，认为对水力传导系数有一个良好的了解是解决问题的最基本条件。但是，在大多数情况下，水力传导系数资料是从一些采样井和抽水试验研究中推导出来的。这些试验研究只给出了传导系数较差的体积近似值，因此以这些近似值为基础预测出来的液体流特性也常是错误的。最近的研究表明，可以将 4D 探地雷达调查用于监测和描绘地下液体流。由该技术获得的大量资料（存在于 4D GPR 资料集中或可从 4D GPR 资料中取得）排除了利用人工解释的可能。因此，必须按照一种半自动化提取模型和便于数据可视化的方式来处理和显示。将这种方法的原理用于博登营资料集，用以说明先进的可视化技术如何帮助原始资料的解释。在博登营资料集中，不同时段反射波的变化揭示了流体迁徙的三维范围。将这种反射波变化的组合（4D 数据集的三维子集不同组合），用于建立一个水文地质特性的模型。虽然从这种模型中不能得到对孔隙度、水力传导系数的定量描述，但它是这些综合特性的定性代表。虽然已取得的成果令人鼓舞，但是在使用 4D GPR 勘查中还有许多野外安排不能解决的问题。在资料采集、数据校正、可重复性及勘查次数等方面的问题还需要研究。

3.3 应用研究实例

雷达相(Radar Facies)被定义为某一特定地层产生的雷达反射图像特征的总和。在雷达资料观测中，地质体的构造和结构特征会影响雷达响应并产生特征效应。将这些特征效应称为雷达相元素，主要的雷达相元素包括反射波振幅、反射波连续性、反射波形态、雷达相组的外部几何形态等。自 1990 年以来，荷兰应用地学研究所在本国东部和北部阻抗性沉积物地区 30 多个实验点测量的成果说明，可以将 GPR 用于荷兰不同水文地质目标的探测。大量科学工作者用 GPR 对不同松散沉积物大量测量和研究证明，GPR 对不同类型的沉积单元具有成像的能力。这种成像具有较高的分辨率，可以做详细的图象分析及剖面最终的雷达地层学解释。他们将测量剖面中每条最具有代表荷兰不同沉积环境特色的部分同反射波图形推断成果剖面组合成一套有这些特征的“雷达相图集”，并且用表格和图像形式出了不同沉积环境雷达相元素的特征。这些图表可以帮助建立“确定不同沉积环境和区别沉积物”的标准。

一般来说，在每一种沉积物的沉积环境内，都可以在雷达剖面上辨认出一些具有特征的反射波图像。在认出大量的这些有特征反射图像的基础上，就能

比较容易地编辑出一套代表某个地区（或国家）反射波图形集合的“雷达相图集”。参照这样的图集，解释人员（不管是否有经验）可以在识别特征反射波图形或在将这种资料转换为可用于水文地质的雷达地层方面得到帮助。随着这种识别雷达图像经验的不断积累，就可以确定和赋予具体沉积环境越来越多的特征；还可以对图像集作不断的改进、扩充和最优化处理。因为相似的反射图形可能存在于几种沉积环境内，所以编辑的这种综合资料库对实际解释工作非常重要。通过识别一条剖面内截然不同的反射图形的组合，将提高正确鉴别有关沉积环境的能力。钻孔和露头资料对雷达相图集是一种补充，特别是在不同沉积环境的岩性单位产生看起来相似反射波图形的情况下。

3.3.2 土壤及浅层水文地质特征

（1）探测土壤厚度和基岩埋深

Robert S. Freeland 等利用 GPR 在美国东南部的七个农业场地获得了有关资料。在田纳西州孟菲斯附近，在地面以下 4m 范围内确定了三个主要的原始土壤层序。第一层是约为 2m 厚的风成黄土淤泥层，这是一层肥沃的高易腐蚀土壤层；第二层为河流阶地冲积层，厚度约为 1m；第三层为高含砂量的第三系。在田纳西州坎伯兰高原的浅部沙质土壤地区和列克星敦附近的岩溶区的勘查中，已经证明 GPR 在下述调查中非常有用：基岩埋深、正在形成的落水洞、土壤层厚度、泥质灰岩、风化砂岩、耕作层及黏土/水分相对突变土壤中的间断。

（2）优先渗流带调查

优先流是通过裂隙和大孔隙、绕过孔隙基质的渗流带中迅速向下流动水流的全部类型。优先流通常具备以下特点：极快的污染物移动速度、提供给延迟分子扩散到微孔隙基质及有关吸附、化学反应和微生物降解的机会较少。因此，在场地特定农业（我国称为准确农业）防止污染物和农药扩散中，了解优先流的具体位置非常重要。英国的水文地质学家已经证实利用传统方法证明优先水流带（特别是在天然降雨情况下）比较困难。但是 Robert S. Freeland 等利用 GPR 在田纳西州孟菲斯附近场地的深部层状土壤内调查时，发现明显的柱状图像。这是垂直水分通过剖面下部流动的有力暗示。在大于 24 小时的间隔内，观察到了一个动态、不稳定柱状图形的缓慢形成和消失。他们将这种现象称为土壤指进（Soil Hydrology—fingering），其实这就是水文地质学家所谓的优先渗流带。

（3）上层滞水

当潜水位以上的包气带中存在脆盘土、黏土层、扁平巨石等隔水层时，将形成自由水面的重力水——上层滞水。在较小的范围内，有时上层滞水能形成一定的供水能力。但是，上层滞水也对农用化肥、农药水平传播具有重要的影响。利用 GPR 有可能将上层滞水的范围圈定出来。

3.3.3 永冻土地区地质环境研究和寻找地下水

美国阿拉斯加北部的间歇永冻土约占该区面积的 75%。永冻土及其内的基岩分布对永冻土上、下的地下水流动起着强有力的作用；永冻土以下的地下水是大多数阿拉斯加州内地的主要含水层；所以在该地区研究水文地质时必须考虑到永冻土的存在。在该地区利用钻孔描述永冻土或寻找地下水，无疑是一种耗资的盲动。

利用 GSSI—4800 型仪器，50MHz 和 100MHz（用车拖天线）及 300MHz 天线采集现场资料。对野外资料进行了车速不一引起的位置变化处理及常规的带通滤波、空变滤波、反褶积和低通道滤波处理。利用反射波同相轴时间延迟，绕射和折射同相轴相位波前的时/距曲线斜率计算介电常数。永冻土的相对介电常数范围为 4.4—8.3；部分或全饱水解冻粉砂、砂岩的范围为 12—45。钻孔位置主要选择在 GPR 初测深部层位显示永冻土下可能有地下水存在的位置。

通过对不同季节采集资料的分析和对介电常数及传播损耗的研究，研究人员认为，在饱水解冻地质材料与永冻土顶部的界面间可能得到 GPR 较强能量的波至。利用 100MHz 及更高频率的天线，可以很好地分辨许多永冻土下可能存在的界面（当然分辨率也需要考虑天线组合形式、季节和地面条件等）。并填绘永冻土以下的地下水剖面图。永冻土内基岩探测的复杂性好象在于如何将基岩的同相轴与永冻土下的地下水同相轴区分开来。视深度无规律变化、振幅大小无常及出现较多的绕射波等特征可能用于将永冻土内部基岩层及其以下含水层区别开来。另外还认为，冬季可能是探测永冻土深部的最好季节。

3.3.4 评价多个含混反射波地区的地下水位和介电常数

在日本国际合作公司（JICA）实施的一项“乌兰巴托及周边地区的供水系统研究”中，用 GPR 在该市与 Tuul 河之间做了探测地下水位和地下垂直介电常数评估实验。

在研究实验中，分别使用了共偏移距、共振源和共中心点法采集资料。发现共偏移距法在低能量介质衰减地区，能取得地下界面的高分辨图像资料，所以将相对简便快捷的该方法用于确定大构造勘查。共振源法比共中心点法施工简单，并且能得到相应的 CPM 道集资料，所以被用于详细的地下构造调查。共

中心点法被用于估算介电常数的测量。

在资料处理方面,利用 30—120MHz 的带通滤波排除雷达系统引起的变频干扰;利用二维 F—K 滤波压制地面建筑在 CMP 道集中形成的高速干扰。通过速度分析,CMP 资料集可以提供地下介质的速度剖面。

为了估计各层的介电常数,必须将均方根速度换算为层速度,再通过层厚度和介电常数的计算,得到介电常数的分布,由于地下含水层内比其它层次内含的水量多,含水层的介电常数值通常比其它层次高。因此,可以用 GPR 资料评估地下水位的埋深。

3.3.5 利用 GPR 调查求取水文地质参数

(1) 孔隙度和水力传导系数对地下水和污染物传播起着控制作用,所以了解这些参数的空间分布对环境科学十分重要。水文地质研究中,通常利用岩石体积质量与颗粒体积质量之比来估算孔隙度;用抽水试验和/或 Kozeny—Carman 关系式来估算水力传导系数。遗憾的是现场的水力资料的数值通常不足以对传导系数在空间域内作出准确的判断。另外,一次抽水试验只能在数米尺度内给出水力传导系数的加权平均值。比较仔细模拟水力传导系数领域的普通方法在于用更多资料来约束该领域,比如用抽水实验期间的水头测量资料。大量非直接的传导系数测量值,即使不准确,也可能给传导系数领域提供一个更好的模拟,进而有可能更好地模拟地下水流。

(2) 地球物理方法可以在很低成本基础上提供大量关于不同物理性质和地层的资料。利用地质统计学可以解决不同尺度测量的水文地层和地球物理资料的归一化问题。GPR 可以提供地面到两个介电常数相异地层界面的电磁波旅行时。GPR 速度和阻抗的变化主要取决于含水量,因此,GPR 资料与水文地质参数间存在着紧密地联系。

(3) Erwan Gloaguet 等在加拿大魁北克一个试验场地 6m × 5m 的小测线网内做了 GPR 试验调查。场地内的最上层为 3.5m 厚部分饱水的中—粗砂层;该层之下为 20m 厚的黏土层。从植入黏土层深部位的一些水位计获取水头测量值。在少数几个位置作了温度和粒度的垂直分析。将水位计、地层和 GPR 资料与地质统计学结合起来确定饱和水与非饱和水层厚度的 2D 分布。一旦确定了到水位计水面和黏土的深度,就可以利用旅行时来计算雷达速度的空间分布。分别利用复折射率法(CRIM)和 Kozeny—Carman 关系式估算孔隙度和水力传导系数;也可以利用 TOPP 公式从介电常数计算含水量。抽水试验和示踪剂试验提供了平均水力传导系数测量值及各向异性资料。饱和带中共克里格算法取得的成果指

出，估算的参数与试验测量的水文地质资料非常一致。

(4) 利用未饱和及饱和砂层中观测到的雷达能量衰减来估算体积电导率。利用阿尔其公式从水位计采集水样的电导率来计算孔隙度。从衰减系数估算的孔隙度与饱水砂中由雷达速度取得的相一致。在包气带，利用 CRIM 或 TOPP 公式从 GPR 速度估算的含水量与多个试验室测量值吻合良好。雷达反射时间和水文地质/地层资料的共克里格算法取得了雷达速度的准确估算，其精度和空间分辨率比 CDP 高出许多。在解释模型的范围内，可以对勘查区的孔隙度、饱和度和水力传导系数作出具有空间分辨率的准确评估。

4. 核磁共振(NMR)技术

地面核磁共振找水技术是目前唯一可用于直接探测地下水的物探技术。利用该项技术除可以获得什么地方有水、有多少水的资料外，还可以获得含水层的有关信息。自 20 世纪 80 年代原苏联新西伯利亚化学动力和燃料研究所(ICKC)在理论和实践两个方面取得 NMR 找水成功后，该项技术用于多国不同水文地质条件下的试验，都取得了较好的效果。但是，仪器抗干扰能力低和探测深度浅的两大缺点，制约了现有仪器的广泛应用。

5. 应用实例

5.1 英国 - 复杂冰封地区的 TEM 填图

为了合理开发英国约克韦尔的地下水并对该区作出合理的环境规划，必须对地区的含水层和隔水层有一个清楚地了解。而现有的地质图仅仅是从钻孔资料推导出来的。本区内的主要含水层为三叠纪的 Sherwood 砂岩(SS)，它直接覆盖于上二叠纪泥灰岩之上。研究地区内东部 2/3 的含水层被三叠纪 Mercia 泥岩(MM)覆盖，西部的其余部分被冰川沉积层覆盖。这是一个复杂的冰封地带，研究区更往南的一些同类地带，已经知道通常存在隐伏在深部的古河道。这里的冰川沉积层包括粉砂质、局部砂质或砾质黏土，粉砂质砂夹局部黏土层和底砂及黏土。零星分布的上层滞水水面出现在冰碛沉积的砂层材料中。大多数冰川沉积物是黏土质的，SS 含水层是承压含水层。该含水层中的水质不一，较厚层 MM 封闭位置的地下水的含盐度比单独由冰碛物覆盖的高出许多。

过去已用直流电阻率法对该区作过调查，但是该方法在区分低反差冰川沉积层和 MM 或 SS 之间以及 MM 与 SS 之间的差别方面存在一些困难；并且，由地面电测深确定的 MM 层序和 SS 含水层的电阻率值不吻合。由于在挑剔的农业区铺设大线圈的困难以及将深度探测的影响减到最小的需要，在试验中，选择了中心线圈

TEM 技术。希望用它能解决的具体问题是：(1) 准确确定 SS 含水层位置的可能性；(2) 评价 TEM 探测在区别粘质冰碛层和泥岩方面的能力。将测线布置在钻孔旁，以便利用钻孔资料判断 TEM 对复杂地体填图的能力。在定量解释中，采用包括直接数据变换和最佳有偏参数估计的两级方法，用于减少成功解释对过去资料的依赖性。

该项 TEM 评价研究选择了 6 个钻孔井位，在厚度和类型上分别代表了 SS 覆盖层的不同地质环境。其中两个测站位于 SS 含水层之上覆冰川沉积物中；一个测站位于 SS-MM 接触的隐露头带，两个站位于存在较厚 MM 的沉积带，最后一个位于 SS 含水层之上存在较厚隔水岩层中。用 Geonics EM47 和 PROTEM47/57 仪器、20 ~ 50mbu 不等线圈分别在六个站做了测量。然后根据不同线圈大小和资料质量对测深曲线做了比较。TEM 研究的模型指出，只要在几个控制点适当地确定电阻率的趋势就可以解释研究区内的主要地层边界。从全部 6 个井位得到的 TEM 成果很鼓舞人心，本次研究采用中心线圈方法和两级资料解释方案可以有效用于本冰川沉积区的地质填图。原先认为 PROTEM47 在该冰川沉积区可以用于 6—8m 地层的推断，但是，前面几个时窗的野外响应似乎被仪器的带通滤波（特别是在阻抗性材料覆盖区）扭曲。这样，就限制了本方法的可用性，并且还影响到后续的资料处理方式。为了克服这种缺陷，另外需要采用小排列（ $AB/2 = 25m$ ）的直流电阻率测深，用于 SS 含水层之上 8m 的探测，以便改进对近表地层的填图能力。因为东部隔水材料的厚度超过 150m，所以本次试验研究认为在东部应使用探测深度能力更强的 TEM 设备和更大一些的发射线圈来对 SS 含水层填图。将 TEM 宽带限制的影响与日常的资料处理结合起来，此外，Sirotem MK3 等仪器具备这种要求深度的填图能力。

5.2 阿根廷某谷地含水层的电法调查

阿根廷的 Antinaco—Los Colorados 构造谷地是一个半干旱/干旱区，该区的地下水是区内最主要的灌溉和人类生活水源。以往的大地电磁法勘测结果推测。该谷地为一个大型沉积盆地；高阻基岩上覆新生界，厚度约 8km，其中第三系沉积物厚度约 6km，其上为第四系洪积物，在山前地带具有多个可渗透亚带，赋存大量地下水。

为了满足区内的用水需要，开展进一步的地电测量。在区内布设了一条东西向的地电测深剖面，剖面线长 35km，包括 17 个垂直电测深点，主要用于浅层填图和确定冲积含水层的几何形状。用施伦贝尔排列，最大 $AB/2$ 为 1500m，电源为 2KW DC，测量仪器的精度为 $0.33\mu V$ 。首先用假设的水平层状模型解释所取得的

视电阻率测深曲线。并将取得的 17 个垂直电测深点的一维电阻率模型与过去的 MT（大地电磁法）和 AMT（音频大地电磁法）研究、钻孔及地质资料结合起来，对含水层的二维横剖面作出了较好的确定。用一种二维正演模拟技术检验了该二维模型的可用性。用这种方法取得了对含水层调查最终模型的系统描述。

与含水层有关地层的电阻率在 80-400 $\Omega \cdot m$ 之间，深度为 50-90m（与该区水井确定的潜水位一致）。该层的范围从测深点 1 延伸到测深点 10。由点 10 往东，该层的电导率增加，可能是含水层盐碱化所致。测深点位 5—6 的 200m 以下，显示出有关新的深部含水层。

根据上述资料，如果按该含水层的東西向延伸为 30km、平均厚度为 80m，含水层 20%的水为可利用水，该含水层具有提供 $14 \times 10^9 m^3$ 地下水的能立。

5.3 岩溶地区水文地质填图的电阻率和地震方法评价

如果不利用电法和地震,在岩溶地区勘察地下水时很难成像；但是，由于岩溶地区地面极不均匀,这对于任何地球物理勘探方法来说都是一个极其困难的环境。研究者已经将双梯度填图（测量两个深度）法、二维电阻率成像、折射地震和高分辨率反射地震方法用于克罗地亚特殊的岩溶地区的勘察。利用梯度填图法对地下电阻率分布有了总的评价。揭示出充水裂隙层的低电阻率带的特点。视电阻率随深度的相关变化图发现两个不同的地带：该区东部电阻率随深度上升的地带和该区西部电阻率随深度下降的地带。与二维电阻率图像剖面对比，在叠加地震反射剖面上可以看到微弱的反射波，但是它们沿整条剖面延续。将折射和反射资料结合起来，可以确定近表和较深部位的断层和裂隙带，这使我们能够准确地确定它们的延伸。将二维反演地震模拟用于说明主要反射层的意义，它们很可能是由于岩性边界引起的，也即是说是白云岩和致密灰岩的接触带。在折射速度、反射速度和钻孔得到的地质资料基础上推出了声波阻抗的模型。在所有资料的基础上建立了一个准确的地质模型。

5.4 浅反地震和 TDEM 综合法在滨海含水层合理管理中的应用

以色列靠近地中海的地区是世界上一个典型的缺水地区。该区可供饮用的地表水匮乏，降雨量稀少。因此，地下水几乎成了整个沿海平原的唯一淡水资源。在这种情况下，以色列人将地下水资源的有效管理问题看得特别重要。但是，像其它许多地区一样，这里的地下水正经受着海水入侵造成的严重盐浸化。由于人口增长带来地下水开采量增大，加剧了问题的恶化。为了合理的管理含水层系统，需要对含水层及其分离的子单元（可能饱和淡水）进行详细地研究。修建监测井或采用地面地球物理方法都能达到这个目的。

在众多地球物理方法中,反射地震是最适合达到该目标的使用方法。但是,单独使用其中的一种方法只能解决具体的一个水文地质问题而不能解决总的问题。比如时间域电磁法(TDEM)在探测盐水侵入方面非常有效。但是在描述地质构造方面却难以获得成功。相反,地震方法在解决地质构造方面具有较强的能力,但它却不能鉴别地下咸水、淡水。因此,解决问题的最好方法是两种方法的有效组合。

过去在以色列不同的沿海平原作过许多地震和 TDEM 勘查,从未将它们的成果综合起来。在以往的 TDEM 勘查中,在几个位置发现位于一个极低电阻率单元(无疑被鉴定为海水入侵)下存在一个高电阻率层,后来证明该层含有地下淡水(称之为水文反转)。遗憾的是在出现不渗透水文地质单元的大多数情况下,即使证明上述模型的正确性,也没单独依靠 TDEM 的解释得出合理的结论。在以色列沿海平原南部的 Nitzanim 地区遇上了这种难题,为了给该地区滨海含水层提供一个详细可靠的研究,在这里做了包括浅层反射地震和 TDEM 的综合地球物理勘查,本次勘查是 INCO - DC 研究项目的一部分。

地震勘查包括两条采用 CMP 技术的高分辨率反射测线,过去的十多年中,已经在不同地区的地热和环境研究 以及与地下水有关的调查中研究和使用了高分辨率反射地震方法。本次的地震线布置在有一些水文地质监测井的附近,以便利用钻孔资料校正地震数据。沿反射测线取得的地震剖面显示出了约为 250ms 的反射同相轴层序。通过用钻孔资料校正地震数据指出,这些反射波可能与含水层内或含水层以下的不渗透层有关。通过沿剖面线追踪反射波,可以评估这些单元的几何形状和横向范围。根据这样的解释,可以将含水层分为由这些不渗透单元隔开的许多亚含水层。在剖面线的几个位置,绘制了显然与浅部断层有关的扰动带图;该扰动带可能与本区各含水层的水力连续性有关。

TDEM 勘查包括了 9 个沿 GI - 0082 地震测线施做的中心线圈测深。发射线圈的大小在 50×50 (海边)到 200×200 (东部)之间的变化,相应的穿透深度约为 100-300m。为了取得较好的垂直分辨率和解释精度,在测线的东部同时使用了浅层 Geonics EM47 和深层 EM37 两种仪器系统测量。TDEM 勘查的成果构成了沿 GI - 0082 测线西部的二维视电阻率断面图。断面图上清楚地指出了海水的入侵(表现为导电性的地电单元)。可以在该断面图上发现一些饱和淡水的亚含水层。但是,一般常规的 TDEM 反演通常不能揭示较深部位的亚含水层。

在 TDEM 初步解释中,解释模型的层次尽可能少。在 TDEM 的再解释中,经过与地震成果的对比,根据地震资料和 TDEM 的初步成果,在初始模型中加入了更

多的层次，这样使我们能够解决上述反演中出现的问题，从而改进了地球物理成果的水文地质内涵。