

遥感、物探、钻探技术在西部严重缺水地区地下水勘查中的集成化研究

水文地质工程地质技术方法研究所 武毅 2006.9.5

我国西部缺水地区涉及陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆、内蒙古、山西、辽宁、四川、重庆、云南、贵州和广西等十三省（区、市），严重缺水区面积达 $217 \times 10^4 \text{km}^2$ ，缺水人口约 4000 万。为了解决上述地区的缺水问题，中国地质调查局从 1999 年开始组织实施了“西部严重缺水地区地下水勘查示范”项目，工作主要部署在西北大型内陆盆地、青海东部和甘肃中东部中小型碎屑岩盆地、宁夏南部和陕西北部黄土高原区、鄂尔多斯盆地周边岩溶区、内蒙古高原、辽宁西部山区和川渝滇红层等地区（见图 1）。



图 1 西部严重缺水地区地下水勘查示范工作布置图

一、西部缺水地区地下水勘查特点及要解决的地质问题

本次研究工作地区水文地质条件较为复杂，既有咸淡水、高氟或高砷等有害离子超标的劣质水共存地区寻找适合于人畜饮用的淡水，更多的则是在水资源匮乏、找水难度大的地区探寻可供开发利用的地下水相对富集、适宜成井的地段。因此，本次研究具有解决特殊问题的任务。

1、地下水勘查特点

（1）地下水分布广泛，寻找可饮用淡水及相对富水地段，勘查难度大。主要体现在以下几个方面：

塔里木盆地及其边缘地区、准格尔盆地等地区沉积着巨厚细砂岩、粉砂岩地层，沉

积颗粒均匀，电性差异小，且广泛分布咸水，寻找淡水体常规方法分辨率不够，需要高分辨率电法支持。

塔里木盆地腹部、山前地下水深埋带等地区地表干燥，接地电阻很高，在水资源匮乏区寻找地下水相对富集及适宜成井地段；接地类物探方法困难较大。

塔里木盆地、鄂尔多斯深埋岩溶区、祁连山山前、宁南山区等地下水水位埋深通常大于 300m，常规方法分辨率不够。

辽宁西部山区、河西走廊山前、甘肃中部第三系盆地边缘、鄂尔多斯盆地周边隐伏岩溶等地区构造分布复杂，查清构造性质、规模及分析其对地下水控制作用是勘查构造裂隙水的关键。

西南红层地区浅层风化裂隙水、承压水具有量小、分散的特点；查明风化裂隙发育特征及其富水性是地下水勘查工作的主要任务，需要浅层高精度的勘查手段。

(2) 祁连山山前地下水深埋区存在大漂砾石地层，宁南山区、鄂尔多斯周边部分岩溶区地层破碎强烈，漏失严重，常规钻探技术钻井困难。

(3) 干旱缺水地区地表严重缺水，钻探用水需要远距离拉水供给，钻探施工用水困难。

(4) 陕北黄土区多泥砂河流及内陆盆地细颗粒地层，泥质含量大，富水性差，取水难度大，需要新的开采技术增大出水量。

(5) 西南红层地区由于钻孔深度浅（小于 30m）交通条件差，需要快捷、易于搬迁，适合红层地区特点的钻进设备。

2、需要解决的关键地质问题：

(1) 咸淡水共存地区，寻找淡水体赋存部位，需要进行地下水矿化度评价。

(2) 山前大漂砾石地层，地下水水位埋深大，需要寻找水位相对浅埋、岩性颗粒相对较细地区开采地下水。

(3) 多泥沙河流及细颗粒地层，泥质含量大，富水性差，需要采用新型取水技术，增大开采量。

(4) 隐伏构造分布复杂，需要精确确定深埋岩溶构造的空间分布特征。

(5) 地层漏失严重及严重缺水地区，常规钻进十分困难，需要采用新型钻进技术。

(6) 西南红层地区地下水主要赋存在浅层风化带中，下伏地层石膏含量大，水质变差。需要查明风化壳厚度及咸淡水界面等。

针对上述地下水勘查特点及要解决的关键地质问题，开展地下水勘查新技术、新方法的研究以及遥感、综合物探、钻探等不同复杂水文地质区地下水勘查技术方法综合性研究是提高地下水勘查成果质量的有效手段。

二、研究思路

在继承传统有效的勘查技术方法基础上，研究适合于西部地下水勘查的遥感、物探及地下水开采的新技术新方法，提升地下水勘查水平。探索研究适合不同类型水文地质区利用高分辨遥感技术圈定具有找水前景的调查靶区、依据适宜的地球物理探测方法确定最佳宜井位、采用有效的钻探和成井工艺技术开采地下水的一套完整的集成化方案，为有效推动严重缺水地区人畜饮用水的难题的解决提供技术支撑。

三、研究成果

(一) 建立了不同水文地质区的遥感找水技术体系，提升了遥感勘查地下水的应用水平

根据遥感解译要求和地质背景特点,将工作区划分为内陆盆地山前平原区、黄土覆盖区、基岩山区和红层地区四种类型,从遥感数据源选择、解译标志建立、信息提取与图像处理等方面进行了系统研究,取得成果如下:

1、总结了不同水文地质区应选择的遥感数据源,建立了正确的找水信息图像解译标志。

由于遥感数据的多源性及其不同水文地质区勘查地下水的特殊性,遥感数据源必须有针对性选择,同时有针对性建立正确的遥感图像解译标志。表1给出了不同水文地质区应选择的遥感数据源。表2给出了不同水文地质区的遥感影像特征。

表1 不同工作区遥感数据源选择

工作区	地下水类型	遥感数据选择
内陆盆地山前平原区	山前活动断裂带和隐伏构造裂隙水	初冬季节获取的热红外图像或秋季的可见光
	山前冲洪积扇区松散岩类孔隙水	多光谱影像、分辨率高的热红外图像
	扇前平原区孔隙水	夏、秋季的全色波段影像,以及对干沙具有较强穿透能力的微波影像
	冲洪积扇前缘与平原区交接地段泉水、地下水溢出带	秋季获取的可见光、红外影像或春初、秋末获取的热红外影像
黄土覆盖区	黄土裂隙水	春季或冬季高分辨率的影像,解译微地貌景观特征,红外以及微波雷达影像,可反映地表及次地表的土壤水分,圈定杖形地、掌形地等局部富水区。
	碎屑岩孔隙裂隙水、基岩裂隙水及岩溶水	秋季多光谱影像和微波雷达图像解译隐伏断裂构造,探测微地貌变化及隐伏断裂破碎带。
基岩山区	山间盆地、河谷川地松散岩类孔隙水	可见光和红外波段影像
	碎屑岩构造盆地、熔岩台地、裸露或隐伏碳酸盐岩区、向斜两翼区	近红外到中红外波段
	构造裂隙水	红外图像或微波遥感图像
	盆地边缘和河谷川地地下水溢出带、泉水出露点	多光谱图像
红层地区	浅层地下水及隐伏构造裂隙水	利用高空间分辨率卫星影像,查明区内微地貌特征,褶皱、断裂构造发育程度,根据岩层的含水性,圈定可能的富水部位。

表 2 不同水文地质区遥感影像特征

地貌影像	内陆盆地山前平原区		山前倾斜平原，影像色调浅而均匀，扇状或放射状的干河床呈灰色或白色细线。
	黄土覆盖区		黄土丘陵沟壑地貌在卫星图像上多表现为浅灰色或灰色调，由树枝状、羽状或平行状水系构成的细密的网状图型。在假彩色合成卫星图像上呈现浅灰蓝、灰黄、浅青绿色，夹红色斑点；较宽的黄土谷地内，有较密集红色或棕红色斑纹，或呈红色弯曲的细带。
	基岩山区		卫星影像上地形形态一般为锯齿状高、中山，圆钝齿状中低山、低山以及风化残坡积物组成的浑圆状丘陵及条带状垄岗坡地。
	红层地区		四川盆地的红外外图像上，影纹成斑壳状、桔皮状为剥蚀丘陵、方山地貌。假彩色合成卫星影像上呈棕黄色、蓝灰色以及粉红色调为剥蚀丘陵。滇西红层分布区多为深山峡谷，地貌影像特征较为明显。
构造影像	褶皱		卫星影像中的褶皱构造影像特征主要表现为背斜、向斜及单斜构造构成的山地及谷地地形。影像判读的难易主要取决于地层岩性的组合特征、差异程度、可解性和产出状态等。
	充水断裂		一般压性断裂的影像线条较细，呈舒缓波状延伸；张性断裂线性形态多呈直线状，影纹多为锯齿状“之”字形排列，色调呈明暗交替规则排列。在黄土覆盖区及红层盆地的隐伏断裂，图像上弱线性体为地貌类型或形态组合的分类、分区界线，依据地下水、植被等信息在图像上所反映色调差异来推断其富水性。
不同含水岩组影像	松散岩类孔隙水	内陆盆地区	从山前地带到盆地中心影像色调由浅至深，具有明显分带性。
		基岩山区、红层地区	山间盆地影像特征与内陆盆地极其相似。湖积平原区潜水含水层组影像在地下水位埋藏较深的区域色调为浅色调，埋深浅的区域影像为暗色调。河谷中的松散岩类孔隙水在影像上通常为：河谷上游，特别是一些支流的上游和支沟色调浅，中下游色调深，主谷与支谷汇合部位色调较深，多呈深浅色调相间的迂回扇和花斑状图案。
	碎屑岩类孔隙水		假彩色合成影像上色调一般为棕黄色、蓝灰色以及粉红色，色块分布均匀，影纹多为蠕虫状、短条带状。
	基岩裂隙水		重点解译线性构造及裂隙发育部位，通常，影像上存在岩性、构造及地形不连续、河流的同向急剧转折、突然加宽、变窄或消失。冲洪积扇群顶端呈直线排列、色调不连续。岩脉的发育、密集成排分布的植物生长带、截然划分的植被等现象大都是断层存在的解译标志。褶皱的轴部往往是裂隙最发育的部位，通过褶皱轴部的解译可确定有利于寻找基岩裂隙水富水区。
	黄土孔隙裂隙水		在假彩色合成卫星图像上呈现浅灰蓝、灰黄、浅青绿色，夹红色斑点，在较宽的黄土谷地内，有较密集红色或棕红色斑纹，或呈红色弯曲的细带，反映有植物存在。

2、探索研究了适合于西部缺水地区遥感地下水信息提取方法与技术。

(1) 地下水遥感信息提取

地下水遥感信息提取基本流程见图 2。一般包括图像处理、地下水提取方法、富水区圈定、专题图制作等内容。

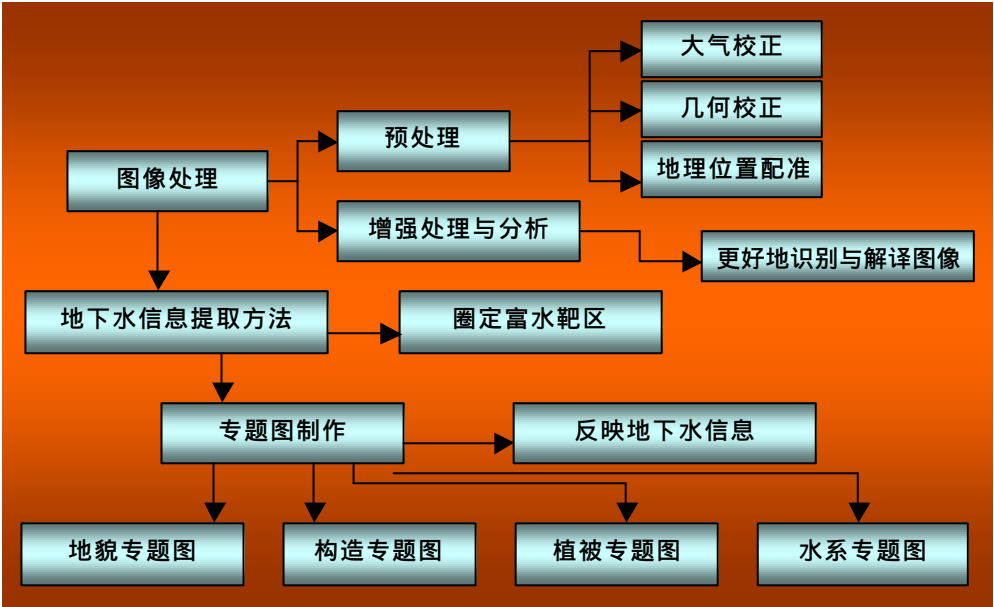


图 2 地下水遥感信息提取流程图

遥感图像处理方法一般包括：图像预处理、图像增强处理与分析等。图像预处理的目的在于突出目标体信息，主要包括：大气校正、几何校正、地理位置配准。增强处理与分析的最终目的是为了能更好地识别与解译图像。经研究适合西部地下水勘查遥感图像增强处理方法主要有波段组合、比值组合分析、主成分分析、HIS 变换法、多源数据融合等。

(2)地下水信息提取方法包括：目视判读与计算机辅助分类、人机交互判读、基于图像理解等（见图 3）。

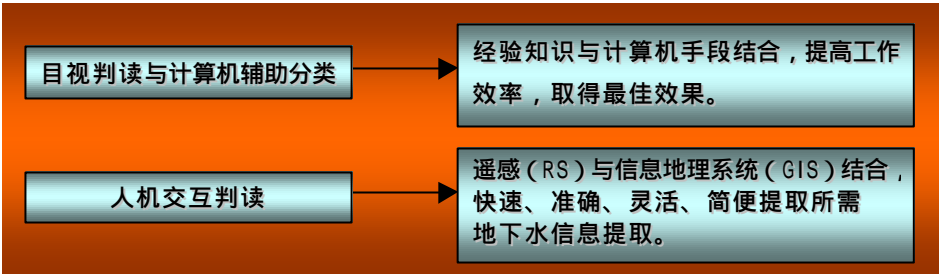


图 3 地下水提取方法

目视判读与计算机辅助分类的目的在于将作业人员的经验和知识与计算机辅助分类能完成大量的、重复性的数值计算工作结合起来，提高工作效率，获得最佳效果。

人机交互解译可从遥感图像中快速、准确、灵活、简便地抽取所需专题信息。特别在自然环境条件复杂的西部地区开展遥感解译工作最具适用性。

(3)专题图制作 专题图主要是反映地下水信息，最主要的表现形式包括地形图、地貌

图、水系分布图、构造图、植被图、地下水遥感信息异常图、地下含水层富水性分区图等。
表 3 为西部不同工作区地貌专题图特征表。

表 3 西部不同工作区地貌专题图特征		
工作区	地貌特征	专题图特征
内陆盆地山前平原区	存在明显的水平分带性，从山前至盆地中心依次为冲洪积扇区、扇前平原区、平原区。	冲洪积扇区呈扇状或放射状的干河床，影像上呈灰色或白色细线；扇前湖带呈断续椭圆形白色环状特征
黄土覆盖区	黄土塬、黄土梁峁、掌形地、杖形地	重点突出微地貌；反映侵蚀和堆积地貌特征
基岩山区	山间盆地、沟谷、河川谷地	分类地貌单元，特别是断裂构造带与地貌单元的分界以及次级地貌特征
红层地区	以宽缓的褶皱构造为主，断裂鲜见，地层近于水平	反映盆地中以砂岩、泥岩叠置的构造剥蚀丘陵为主。明确褶皱、断裂的地貌特征及分布

(4) 地下水信息与影像图特征关系

地下水信息与影像图特征关系一般反映在以下三个方面，即：土壤含水量、植被分布图生态状态、构造痕迹等（见图 4）。

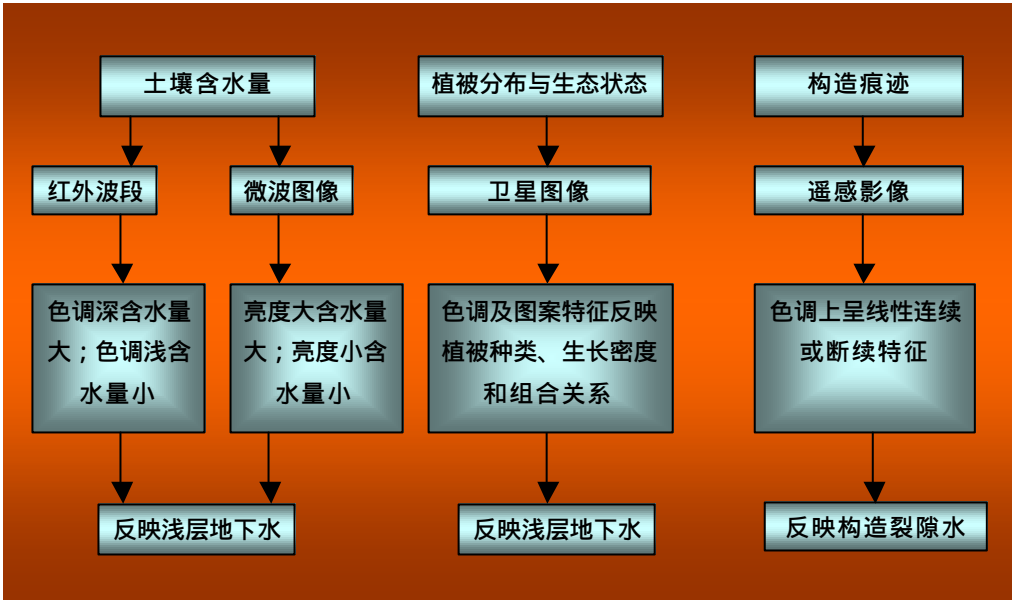


图 4 地下水信息与影像图特征关系

土壤水分与地下水遥感影像特征的相关性

利用遥感图像提取地下水信息的实质是提取与地下水相关的间接信息。土壤含水量的大小往往从一定程度上反映浅层地下水的发育状况，对土壤湿度的探测常选用红外波段或微波图像。

近红外波段对水的反射率低，土壤含水量越大，图像上色调越深。热红外波段反映地质体自身辐射信息，浅表层含水土壤在影像上以冷色调出现。微波图像对浅表地层土壤湿度反映敏感，土壤水分含量的微小改变会使图像的亮度值发生明显的改变，在地形较平坦、土

壤岩性均一的情况下尤其明显。通常，影像色调明亮，反映土壤水分含量较高，影像色调暗，反映土壤水分含量低，较为干燥。

在土壤水分含量较大的地下水溢出区或浅埋区，遥感图像上具有较高的亮度值，而在沙漠区、风积沙等覆盖的贫水区或非含水区，图像一般具有较暗的色调。应用微波雷达图像在干旱-半干旱区进行浅层地下水探测与不同含水程度分区可以取得良好效果。

植被分布及生长状态与地下水遥感影像特征的关系

根据植被在卫星图像上显示的色调及图案特征，划分出不同的植物群落，以此获取地下水的埋深、富集程度及矿化度等一系列信息。

3、建立了不同水文地质区遥感勘查地下水方法技术体系（见表 4-7）

表 4 内陆盆地遥感勘查地下水方法技术体系

数据源	时相波段	图像处理	信息提取
ETM - TM - SPOT - SAR	盆地周边秋、冬季节可见光、红外波段影像；沙漠-绿洲交错地带春初或秋末热红外图像；活动断裂、隐伏构造及埋藏古河道秋末、春初红外、热红外波段及微波图像。	TM/ETM 三波段组合和 ETM6 热场数据、微波雷达数据和 ETM8 全色高分辨率数据的融合。	土壤含水量较高的“湿地”

表 5 黄土覆盖区遥感勘查地下水方法技术体系

数据源选择	图像处理与地下水信息提取
黄土裂隙水利用较高分辨率的 ETM、SPOT 或 SAR 图像；下伏构造水选择 TM/ETM 热红外波段。	采用 TM5、TM3、TM2 或 ETM5、ETM3、ETM2 波段组合

表 6 基岩山区遥感勘查地下水方法技术体系

数据源选择	图像处理与地下水信息提取
主要数据源选择为 TM/ETM，基岩裂隙水、构造裂隙水以红外波段及微波图像为主；解译河谷川地地下水溢出带、泉水出露点等，以 TM6/ETM6 图像为主。数据时相选择受干扰因素较少的冬、春季节，热红外图像选择春初、秋末季节较好。	采用多光谱图像波段组合或波段比值组合，以 TM 图像为主，TM7、TM4、TM1 及 TM5、TM4、TM3 波段组合

表 7 红层盆地遥感勘查地下水方法技术体系

数据源选择	图像处理与地下水信息提取
浅层孔隙裂隙水以春季 ETM 图像为主，基岩裂隙水、构造裂隙水选用 TM、ETM 及 SPOT 或 SAR 图像。	采用 TM/ETM 可见光波段图像假彩色合成，或采用 TM/ETM 与 SAR 图像融合进行图像增强处理，利用主成分分析方法提取

4、取得了不同水文地质区遥感找水的应用成果，效果良好

利用上述的研究成果，分别在基岩山区、红层丘陵区、内陆盆地等不同水文地质区开展应用实践，取得了良好的效果。下面仅介绍在辽宁西部山区的应用效果。

辽西山区遥感工作的任务是根据辽西地区的地质背景特点，开展 1：5 万遥感地质解译，查清工作区不同类型地下水遥感找水信息异常分布位置、确定遥感找水靶区，为该区开展地下水勘查提供找水方向。

（1）工作方法

遥感数据源确定 通过各种组合方案实验对比，在示范区以色彩丰富，层次分明、可解程度高的 ETM7、ETM74、ETM1 合成图像作为基础图像。

图像处理 图像处理是在 ETM 图像单波段数值分析的基础上，选取水文信息丰富的单波段图像，进行相关性分析，筛选 3-4 个波段进行假彩色合成研究，确定 ETM7、ETM4、ETM1 波段假彩色合成并进行了反差增强，与 ETM8 融合图像作为各县（市）信息提取的基础图像（图 5）。

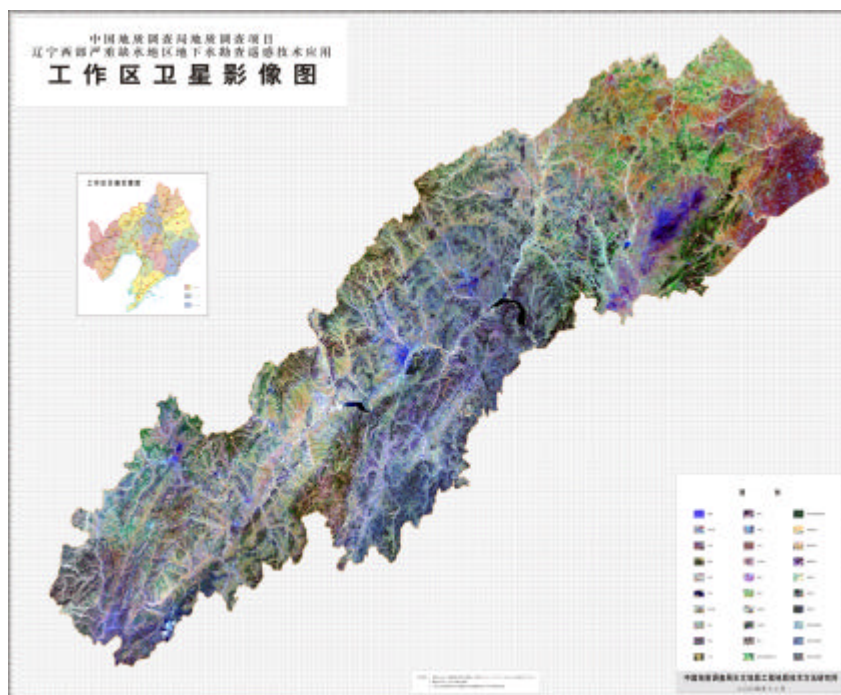


图 5 辽西五县遥感卫星影像图

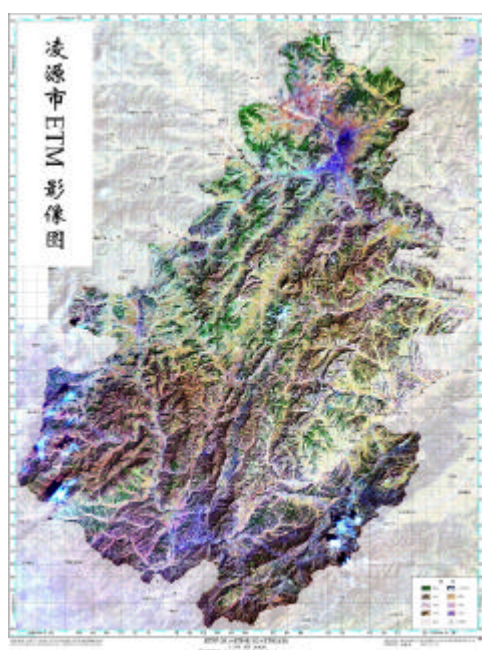


图 6 凌源市 ETM 影像图

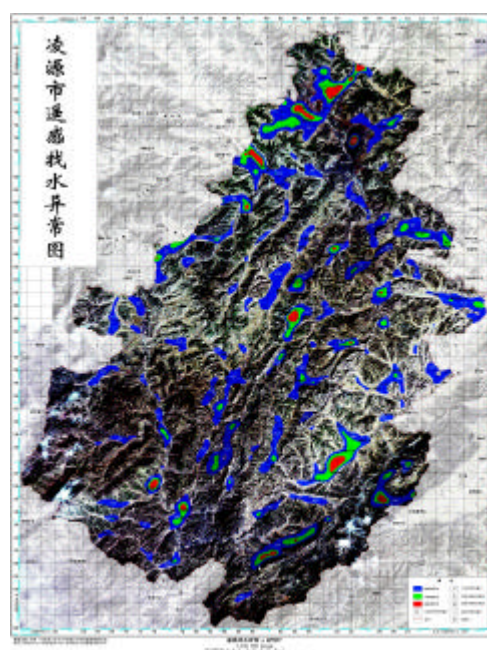


图 7 凌源市遥感找水信息异常分布图

遥感找水信息提取 信息提取方法采用 ETM1、ETM2、ETM3、ETM4、ETM6/5 作为输

入因子进行主成分变换。主要反映了 ETM6 对水的敏感程度，揭示松散砂砾石层、土壤富水程度，以及断裂、褶皱、基岩破碎带的含水程度和湿度。通常异常信息级值愈高，含水程度愈强。根据地表地层岩石、构造的含水程度与地下水的关系，可作为寻找地下水的信息。遥感找水信息异常按“均值 $\pm n$ 倍的标准偏差”分为三级，并按低值-中值-高值分别赋予蓝、绿、红颜色（图 6、7）。

(2) 勘查结果

根据遥感找水特点，结合勘查区水文地质条件，本次遥感找水信息分为两大类五亚类：一大类为第四系松散层中的找水信息，其中又分为河谷区和山前地带找水信息两个亚类。二大类为基岩中的找水信息，其中又分为断裂型、褶皱型和基岩风化裂隙型三个亚类找水信息。

第四系松散层中的找水信息

、河谷区（称河谷型）

该类找水信息主要出现在河谷地带河床、河漫滩亚砂土、亚粘土、砂砾石上，反应的是河床阶地、河漫滩间谷地上松散土壤、砂砾层上的含水地段或水份大的地段，指示在第四系砂砾层中寻找松散层孔隙水的信息（图 8、9）。这类信息明显与工作区水系河谷分布有关，它们大体可分为大凌河、青龙河、渗津河流域和下洼段等信息异常带。

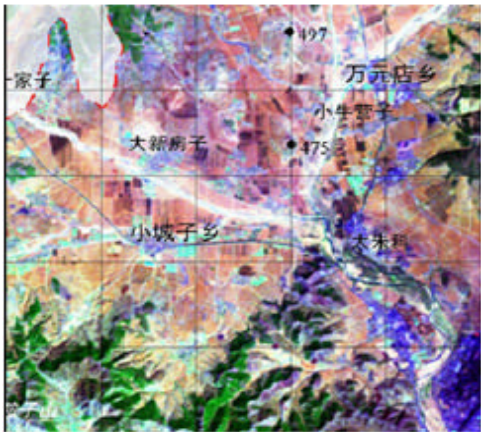


图 8 小城子乡 ETM7/4/1 (8) 影像

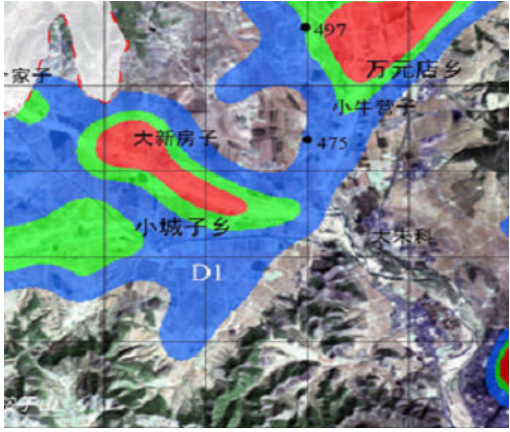


图 9 小城子乡水信息异常（河谷型）

、山前裙裾地带（称山前型）

这类找水信息主要出现在山前裙裾地带，该地带主要是坡洪积的亚粘土、砂砾石和黄土状土，这类找水信息大多分布在地形低洼部位、坡洪积裙裾前缘和冲洪积阶地后缘，沿山间

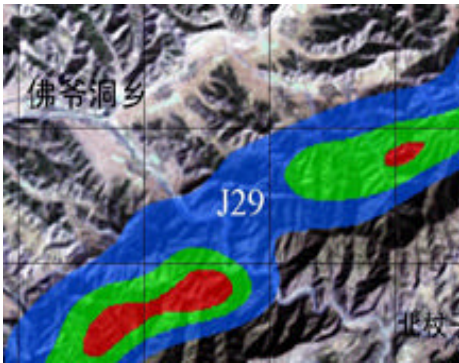


图 10 佛爷洞乡水信息异常（断裂型）



图 11 佛爷洞乡解译构造及地下水类型

谷地分布。反映出这些部位的松散堆积层中含（富）水或水份湿度较大。

基岩中的找水信息

、断裂带（称断裂型）

这类信息沿断裂（带）通常呈带状、断续带状出现，反映出充水的或含水的断裂地段。如在凌源市中东部河坝台一带的 NNE 断裂、中部松岭镇的几条 NNE—近 SN 向断裂、南部水泉子一带的 NE 向断裂上的异常（图 10、11）。

、褶皱构造（称褶皱型）

这类信息大多与向斜构造有关，有的出现在向斜轴部，有的出现在向斜端部或者出现在向斜一翼。

、基岩风化裂隙（称基岩风化裂隙型）

这类找水信息主要出现基岩顶板风化壳中的裂隙发育地段，是基岩风化裂隙水的找水信息。

圈定遥感找水靶区

以遥感水信息异常为基本标志，尤其是一级异常，当它们出现在诸如构造断块界面，断裂与断裂交接或突变地段，且地表或浅地表湿度较大，侵蚀-剥蚀程度适中的地貌单元类型突变地段，又具有良好的含水层存在时，即可圈定为遥感找水靶区。如图 12 为凌源市小城子乡第四系松散层河谷型靶区，图 13 为凌源市佛爷洞乡断裂型靶区。

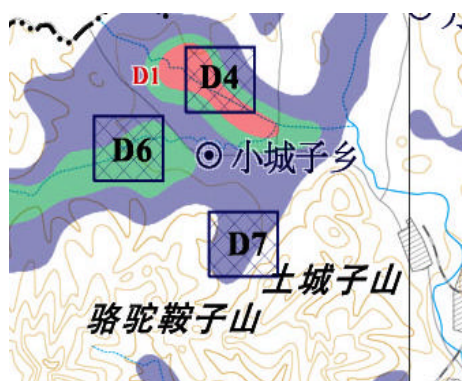


图 12 小城子乡河谷型找水靶区

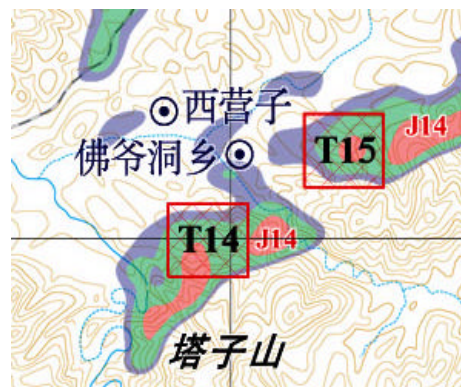


图 13 佛爷洞乡断裂型找水靶区

辽宁西部丘陵山区地下水勘查遥感技术应用是根据遥感技术特点，结合勘查区水文地质条件，主要寻找基岩裂隙水和松散层孔隙水。在松散层提取地下水遥感信息效果较好，选取 ETM 时像、提取方案合适；基岩断层在影像上特征明显，水信息异常在主断裂北北东向反映较好，但小断层反映异常较差。

（二）开展了地下水地球物理勘查技术方法集成化研究，为不同类型的地下水勘查提供了技术支持。

物探技术方法较多，可分为重、磁、电、震、核、热及测井等七大类几十种方法（表 8）。其中电法应用最为广泛，是地下水勘查中最主要的手段，尤其近年来，一些新的物探技术（如：音频大地电磁测深法、瞬变电磁法、浅层地震反射法、核磁共振法等）的引入，在勘查深度、分辨率、获取与地下水有关的信息量等方面都有了极大地提高，促进了地下水勘查技术的发展。在本次研究工作中，重点开展了以下几个方面的研究。

表 8 地下水勘查的地球物理技术方法

重力场	重力法	磁力场	磁法	
	微重力法		高精度磁测	
核	径迹法	地震	高分辨率浅层地震法	
	卡法		三维地震法	
	杯法	电	直流电法	电阻率法（电测深、电剖面、高密度电阻率法、电反射法等）
	P_{α}^{210} 法			激发极化法（时间域）
热	地温测量法		交流电法	音频大地电场法
测井	电阻率测井			甚低频法
	自然电位测井			音频大地电磁法
	自然伽马测井			可控源大地电磁法
	声波测井			大地电磁测深法
	伽马—伽马测井			阵列电磁法
	中子测井			探地雷达
	核磁共振测井			核磁共振法
	介电常数测井			瞬变电磁法
	层析成像测井		自然电位法	
	流速、流向测井		充电法	

1、研究了几种地球物理勘查新技术新方法在西部不同缺水地区勘查地下水的适应性和可行性，为地下水地球物理勘查提供新的技术手段。

开展的地球物理勘查地下水新技术新方法包括音频大地电磁测深法（EH-4 电导率成像系统）、瞬变电磁测深法、核磁共振找水法、高分辨率地震法等。各种方法的特点及用途见表 9。

表 9 几种新技术新方法勘查地下水特点及用途

方法技术	特点	主要用途
音频大地电磁测深法 (EH-4 系统)	勘查深度大、分辨率高、对接地电阻要求不高。	评价地下水矿化度分布特征,适用于淡水体以及中深层、复杂地区、困难地区地下水勘查。
瞬变电磁测深法	勘查深度适中、不存在接地和静态影响问题。	评价地下水矿化度分布特征,适用于淡水体以及山区地下水勘查
核磁共振找水法	直接给出含水层埋深、厚度、含水量等参数。不存在接地问题。	适用于埋深小于 150m、周围无电力干扰的浅层地下水勘查
浅层高分辨率地震法	精细描述地层结构特征	用于深层地下水勘查

2、通过分析不同类型地下水地球物理勘查地下水的特点，研究和建立了不同类型地下水地球物理勘查技术模式。

(1) 咸水区寻找淡水体勘查模式

西部严重缺水地区咸水广泛分布区主要包括塔里木盆地及其边缘地区、柴达木盆地，鄂尔多斯盆地白垩系地层以及局部基岩地区等。应用地球物理方法在广泛咸水分布区内确定淡水资源的存在特征，电阻率是唯一参数，采用的地球物理方法只有对电性敏感的电法手段。勘查模式见图 14。工作步骤如下：

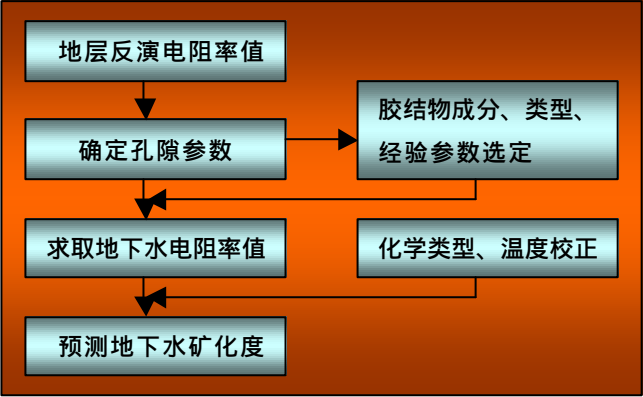


图 14 咸水区寻找淡水体地球物理勘查模式

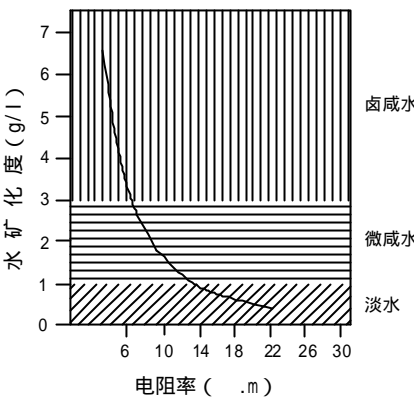


图 15 电阻率与地下水矿化度关系曲线

采用高分辨率电阻率法勘查，经过正反演技术，求取地层真电阻率值。

综合分析影响电阻率测量的主要因素，合理选择相应的参数（孔隙度、温度、泥质系数、孔隙指数等）。

求取地下水电阻率，考虑水化学类型、温度校正，预测地下水矿化度。

该类勘查模式适用范围：松散类孔隙水及胶结、半胶结类孔隙裂隙水并且地下水电阻率与矿化度呈对数关系（见图 15）。

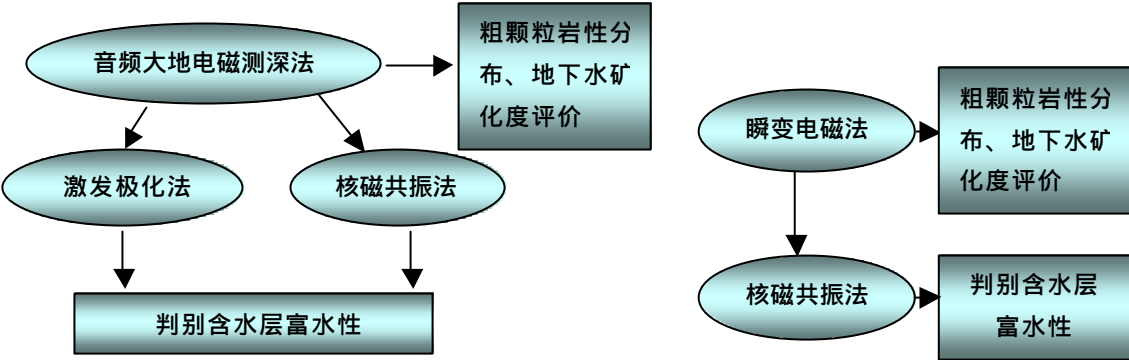
（2）贫水区中寻找富水地段的地球物理勘查模式

贫水区中寻找富水地段主要有以下几种情况：一是圈定松散沉积岩粗颗粒岩性的分布范围；二是查明碎屑岩砂岩、砂砾岩地层中孔隙裂隙发育位置；三是查明基岩构造空间分布特征及性质，分析构造控水机制；四是查明岩溶构造发育特征。不同类型地下水地球物理勘查技术模式如下：

孔隙水 主要分布在内陆盆地多层结构区、山前地下水深埋带以及黄土地区等。

、内陆盆地多层结构区松散岩类孔隙水

以寻找细砂、中砂、中细砂、粗砂等粗颗粒岩性中的地下淡水为主要目标。勘查特点是：



（a） 接地条件好

（b） 接地条件差

图 16 内陆盆地多层结构区浅层孔隙水勘查模式

岩性颗粒差异、电性差异小，局部勘查深度大，接地电阻高。选择对电性敏感、分辨率高、接地电阻要求不高的电法勘查手段最为适宜。图 16 和图 17 分别给出了浅层地下水（小于 200 米）和深层地下水勘查模式。

、内陆盆地山前松散岩类孔隙水

以山前深埋带孔隙水为主要勘查目标。需要查明山前隐伏断裂性质及其对地下水控制作用，断层两侧地层岩性结构、水位埋深。勘查特点是勘查深度大，水位埋深大（一般超过 300 米），地表较为干燥，需要采用电磁法类勘查手段。因此，该区可采用音频大地电磁测深法或瞬变电磁测深法。在条件允许下，采用浅层高分辨率地震法也能取得较好的效果。

、黄土区孔隙水、孔隙裂隙水

该类地下水勘查需要解决的地质问题有：孔隙水、裂隙孔隙水的赋存部位，埋藏深度及其富水性。勘查特点是：埋深小于 100 米，电阻率变化不甚明显，极化率与地下水赋存有关。其勘查模式见图 18。

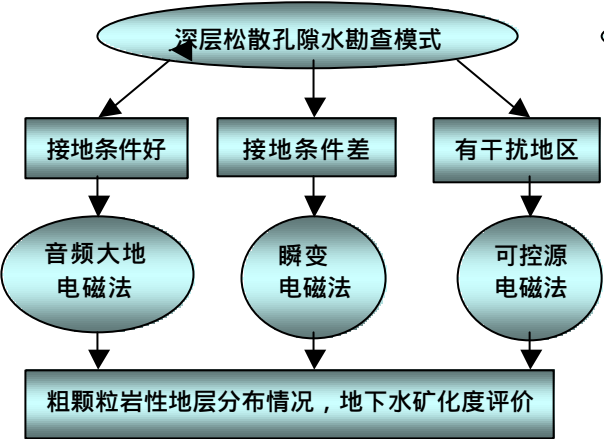


图 17 深层松散孔隙水地球物理勘查模式

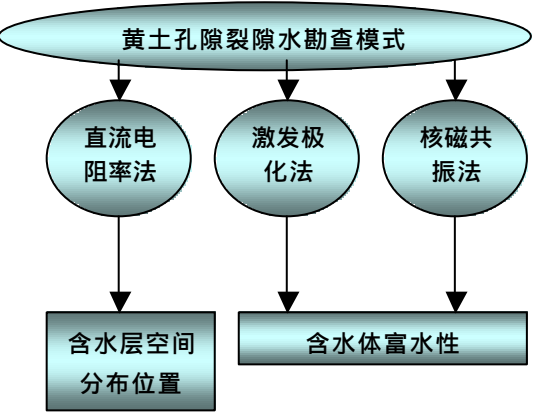


图 18 黄土区孔隙水孔隙裂隙水勘查模式

裂隙水 西部地区裂隙水按赋存地下水介质分为风化裂隙水、层间裂隙水和构造裂隙水三种类型。

、风化裂隙水

风化裂隙水的富水性取决于砂质成份的多少和风化裂隙发育程度，一般以砂质为主的岩层其富水性相对较好。物探技术勘查模式见图 19。

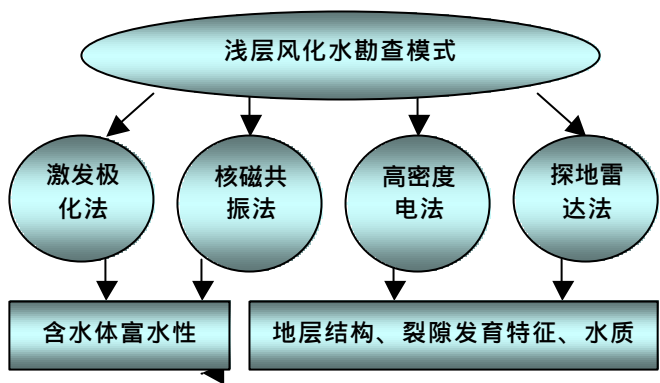


图 19 风化裂隙水勘查技术模式

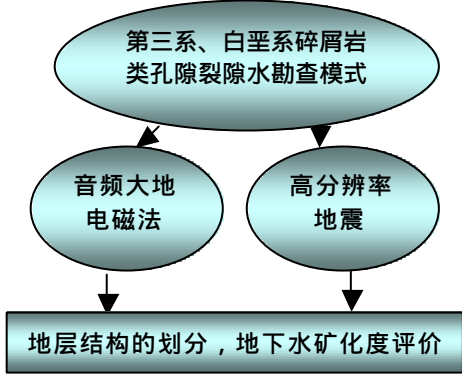


图 20 第三系、白垩系碎屑岩类孔隙裂隙水地区地球物理勘查技术模式

、层间裂隙水

层间裂隙水主要包括第三系、白垩系盆地碎屑岩类孔隙裂隙水，以寻找砂岩、砂砾岩地层中的孔隙裂隙发育，地下水富集地段为主要目标体。其特点是含水层岩性以胶结、半胶结为主，孔隙度小，含水层稳定，地下水矿化度变化较大。地球物理勘查技术模式见图 20

、构造裂隙水

构造裂隙水勘查物探要解决的问题是确定构造的空间分布特征、构造破碎带的发育程度等。选择的方法包括电法、地震、放射性、甚低频等，地球物理勘查技术模式见图 21。

深埋岩溶水主要受隐伏构造的控制，地下水分布极不均匀，地球物理勘查工作难度较大。采用的物探方法有音频大地电磁测深法、高分辨率地震等。地球物理勘查技术模式见图 22。

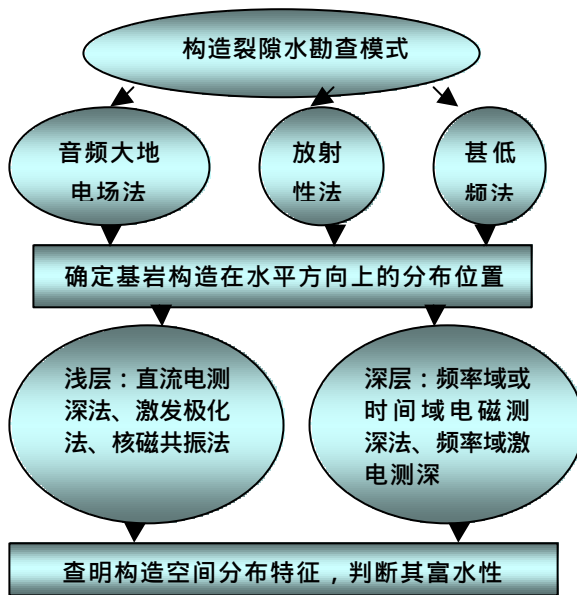


图 21 构造裂隙水地球物理勘查模式

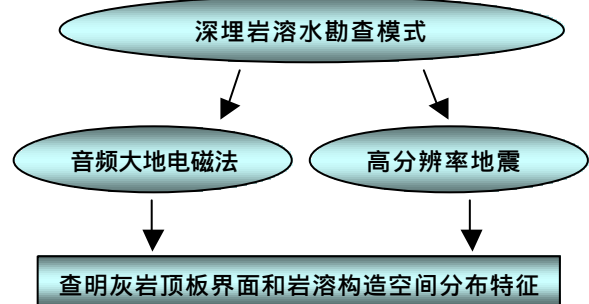


图 22 深埋岩溶水地球物理勘查技术模式

、浅埋岩溶水

浅埋岩溶水一般赋存在浅埋的石炭系、二叠系和三叠系的灰岩构造中，往往岩溶最为发育，也最富水。富水性受构造控制。在接地条件好的地区，首先采用电阻率剖面法、音频大地电场法等手段了解构造带平面分布特征，利用激电测深法、核磁共振找水法可判断构造破碎带富水性。在接地条件较差的地区，采用瞬变电磁测深法查明构造带空间分布特征及其性质，利用核磁共振技术（深度小于 150 米时）判断构造破碎带富水性。

岩溶水 西部缺水地区岩溶水包括深埋岩溶水和浅埋岩溶水。

、深埋岩溶水

3、不同地下水地球物理勘查技术模式在实践中得到应用，提高了地球物理勘查地下水的技术水平

西部严重缺水地区地下水地球物理勘查解决的地质问题大致分为两类，一是咸淡水共存地区地下淡水体勘查，二是贫水地区寻找相对富水地段的勘查。下面就介绍本次研究成果解决这两类地质问题的应用效果。

（1）咸淡水共存地区寻找淡水体的应用效果

塔里木盆地

塔里木盆地第三系、第四系松散沉积厚度达 1000 余米，岩性单一。但由于沉积环境以蒸发为主，其地下水矿化度普遍偏高。在整个盆地的形成过程中，各个不同时期的“古”河道或冲积地层中可能赋存有可供利用的淡水或微咸水资源。本次研究工作依据其水文地质条件，选择音频大地电磁测深法开展地下水矿化度评价工作。在工作过程充分考虑了温度、地下水矿化度、孔隙度等对电阻率测量因素，建立了咸淡水解释标准（见表 10、11）。

表 10 粉细砂层视电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）与地下水矿化度（g/L）的对应关系（20 $^{\circ}$ C）

地下水矿化度		0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
视电阻率	地下水	10.00	5.50	4.00	3.00	2.50	2.00	1.60	1.30	1.00	0.90	0.84
	粉细砂	28.30	15.56	11.32	8.49	7.07	5.94	4.53	3.67	2.83	2.54	2.38

表 11 亚粘土层视电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）与地下水矿化度（g/L）的对应关系（20 $^{\circ}$ C）

地下水矿化度		1.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	15.00	20.00
视电阻率	地下水	5.50	1.30	1.00	0.90	0.84	0.75	0.70	0.60	0.46	0.36
	亚粘土	14.80	3.49	2.69	2.42	2.15	2.02	1.88	1.60	1.24	0.97

图 23 是沿塔中沙漠公路音频大地电磁法勘测剖面图。由图可见：在垂向上，地层电阻率值总体上由浅到深逐渐升高，反映了地下水上咸下淡的特点。而在水平方向上，140Km 附近出现了一个稍向南倾斜的垂向电性界面，界面附近视电阻率为 3-3.5 Ωm ，而两侧地层电阻率有较大不同，界面以南至昆仑山山前平原地下水溢出带 200m 以下地层视电阻率大于 4 Ωm ；界面以北至现代塔里木河冲积平原区，地层视电阻率均小于 3 Ωm 。

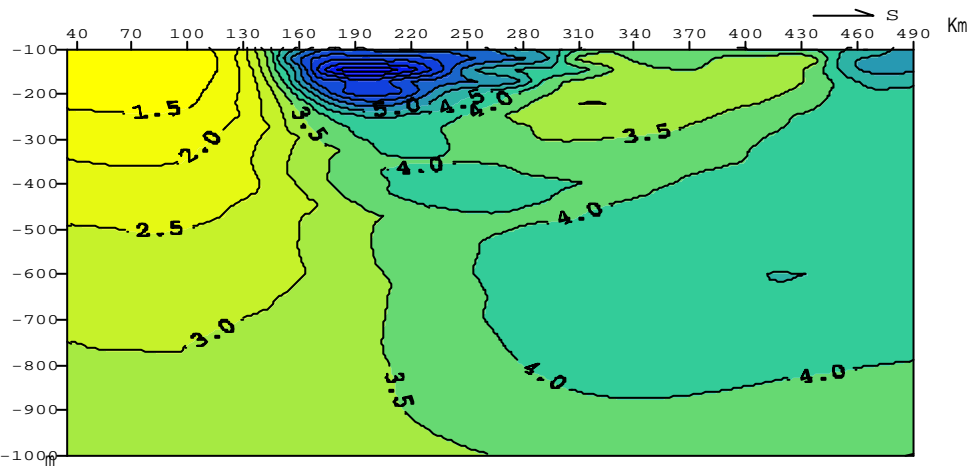


图 23 塔中公路音频大地电磁勘测剖面

图 24 是根据图 23 勘查结果，按照上述咸淡水解释标准，解译的地下水矿化度分布图。由图可见：垂向电性界面附近，自上而下地下水矿化度均在 5g/L 左右，界面南侧 200m 以下为 3—5g/L，200m 以上浅局部地段小于 3g/L；界面北侧均大于 6g/L，浅部最大可达 20g/L。

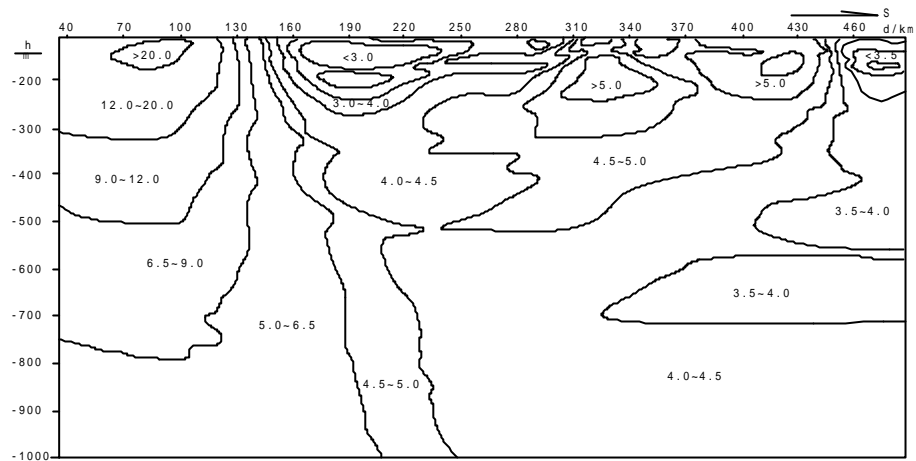


图 24 塔中公路沿线地下水 TDS(g/L)分布图

鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地白垩系地下水为胶结、半胶结碎屑岩类孔隙裂隙水，由于受古气候、地理条件的控制，赋存于其间的孔隙地下水矿化度变化复杂。为了了解地下水矿化度宏观变化特征和白垩系地层特点，选用音频大地电磁测深法开展工作。该类地层中寻找淡水体除地下水矿化度是影响电阻率的主要因素外，地层孔隙度也是一个主要影响因素。因此，在利用物探技术方法评价地下水矿化度时除了要考虑松散孔隙水矿化度评价参数外，另一方面主要考虑的参数有反映地层泥质含量的泥质系数（ a ）和孔隙结构的孔隙指数（ m ）。

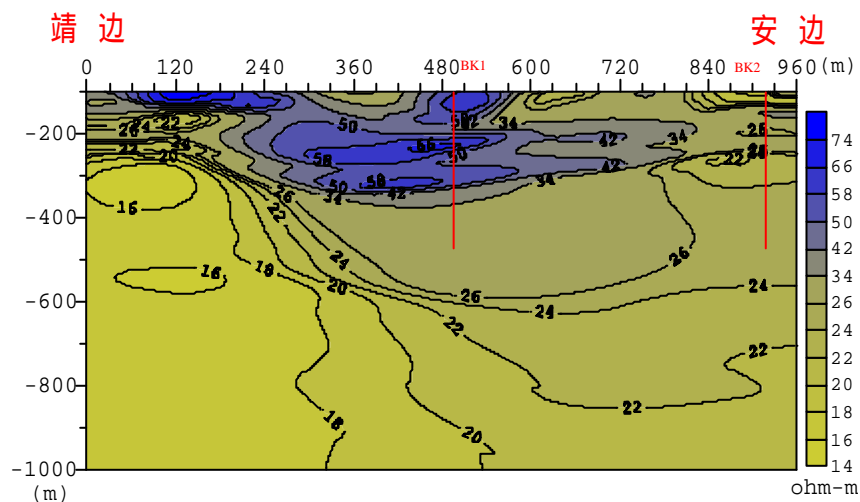


图 25 鄂尔多斯白垩系盆地中部靖边至安边 EH-4 剖面图

图 25 是鄂尔多斯白垩系盆地中部靖边至安边电阻率剖面，图中标 BK1 和 BK2 为两勘探孔，相距约 50Km。BK1 孔第一含水岩组环河-华池组 68.0-262.3m，岩性以中细粒长石石英砂岩为主，平均孔隙度 27.8%，矿化度 0.46g/L；第二含水岩组洛河组 262.93-596.85m，岩性以中粗粒长石石英砂岩为主，平均孔隙度 24.5%，矿化度 0.55g/L。BK2 孔第一含水岩组环河—华池组 32.0-563.0m，岩性为中细粒长石石英砂岩为主，平均孔隙度 12%，矿化度 4.46g/L；第二含水岩组洛河组 563.0-841.20m，岩性为石英长石细砂岩，平均孔隙度为 17%。

上述各含水岩组均以泥质胶结为主。可以看出，白垩系地层无论其电阻率，还是地下水矿化度、地层孔隙度在纵横方向上有较大变化。此外，含水层为半胶结类碎屑岩，根据地层结构特征，取孔隙指数 $m=1.5$ (代表结构因子)，泥质系数 $a=0.7$ (代表泥质因子)，各含水岩组矿化度计算结果见表 12。

表 12 鄂尔多斯白垩系盆地地下水矿化度划分结果表

孔号	含水组	参数	电阻率($\Omega \cdot m$)	温度($^{\circ}C$)	矿化度(g/L)
BK1	环河-华池	$a=0.7 \quad m=1.5$	65		0.55—0.37
	洛河	$a=0.7 \quad m=1.5$	30		1.16—2.96
BK2	环河-华池	$a=0.7 \quad m=1.5$	22		4.2—3.4
	洛河	$a=0.7 \quad m=1.5$	21	32	2.0—2.4

上述勘查结果已经表明：利用电阻率值评价胶结、半胶结碎屑岩类孔隙裂隙水矿化度已取得一定的效果，但个别含水岩组计算结果与实际情况差别较大，其原因是选取的泥质系数和孔隙指数可能误差较大，直接影响计算结果。因此，在该类地层条件下，比较准确的选取相关参数至关重要。

通过上述实例，对咸水区中寻找淡水体地球物理勘查模式总结以下几点：

电法是寻找淡水体必须使用的一种方法。

根据不同地质单元的地质、水文地质条件，综合分析影响电阻率值的主要因素，合理选择相应的参数。

对于深层（大于 500m）的淡水体勘查，要进行温度校正，准确换算地层水电阻率值。

评价地下水矿化度的电阻率值标准不同地质单元标准不一。

（2）贫水地区寻找富水地段的应用效果

松散岩类孔隙水

要解决的地质问题包括：查明松散岩类地层岩性结构，了解含水层埋深、厚度及其分布范围，圈定地下水富集地段。下面介绍几种常规物探方法组合应用在陕北富县河谷区地下水勘查效果和核磁共振新技术在陕北子洲县河谷区勘查效果。

、陕北富县河谷区地下水勘查

富县县城找水勘查以洛河河谷区为主，主要寻找洛河古河道或地下水强径流带，岩性为砂卵石，砾石，但泥质含量较高，称之为多泥砂河流。物探的主要目的是查明河谷川道中第四系含水层及基岩风化壳的分布、富水性及基岩风化裂隙发育带的空间展布，寻找地下水强径流带。选用方法为电阻率测深、激电测深、杯法等。图26为富县河谷区地下水勘查结果。从图中可以看出：

第四系冲积层在高漫滩及阶地上，厚度可达 8 - 20m，其中：洛河河谷冲积层厚度为 10—20m，岩性以亚砂土、卵、砾石层为主。

洛河古河槽宽 70 - 90m，厚度约 20m。

主要含水岩组为卵、砾石层，含水层厚 10 - 16m。

富水地段：分布于古河槽内，地下水赋存条件相对较好，水量较丰富。

根据勘查结果，确定在河谷古河道中实施渗流井取水工程。竣工后出水量达 3264m³/d，验证了勘查方法的有效性和选择渗流井取水方式的正确性。

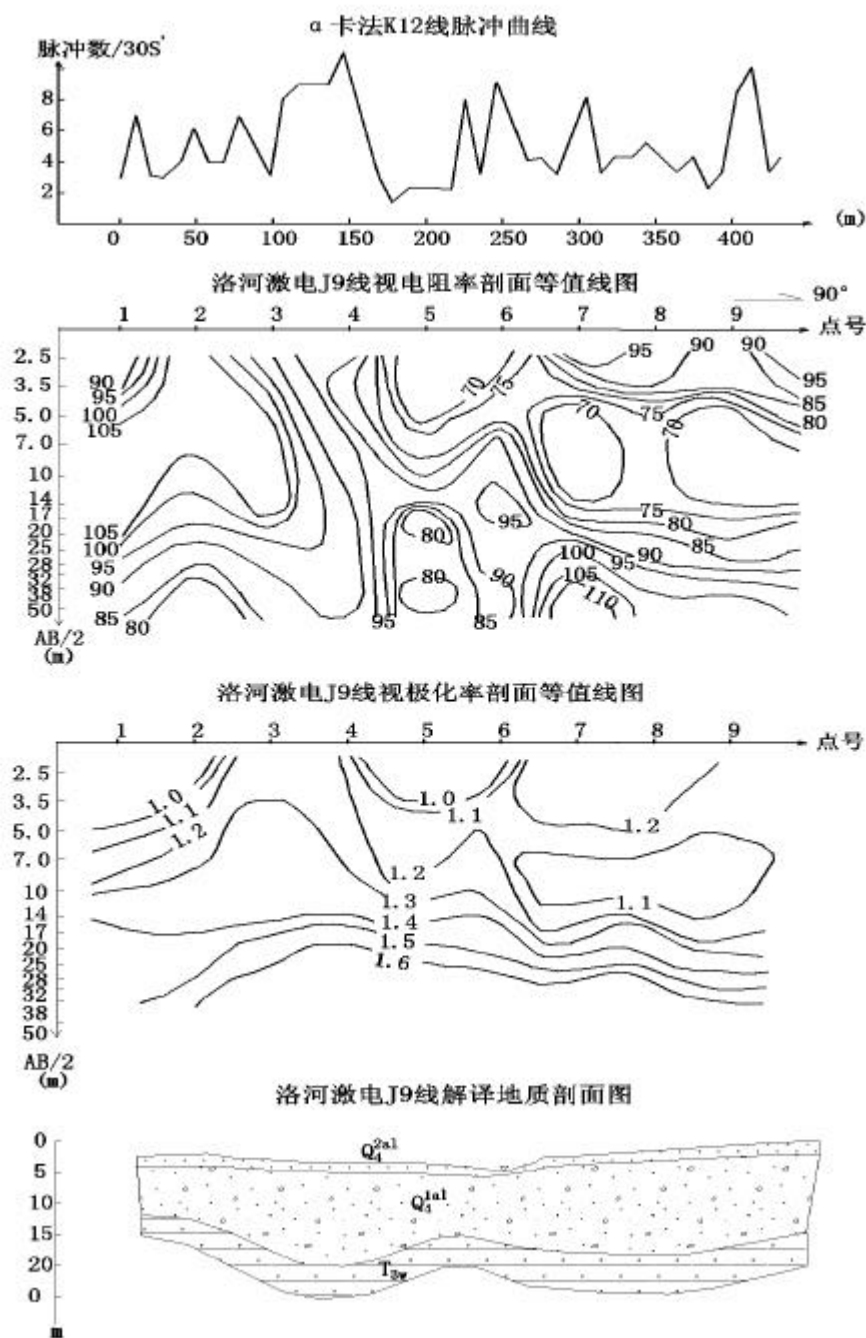


图 26 陕西富县河谷区地下水综合物探勘测结果

、陕北子洲县河谷区地下水勘查

子洲县位于大理河河谷区，地下水勘查以河谷区砂卵石为主。本次工作选用核磁共振直接找水新技术。图 27 为子洲县大理河河谷区核磁共振测量结果。图中右侧直方图直接反映出含水层特征，2—3m、6—7m 反映第四系孔隙含水层特征，14.9—24.4m 反映出基岩风化裂隙水的含水层特征。左侧表格为反演结果数据，表示不同含水层的起止深度、含水量和衰减时间。可见，核磁共振找水新技术能直观给出含水层埋深、厚度和含水量等信息，是物探技术的一大进步。

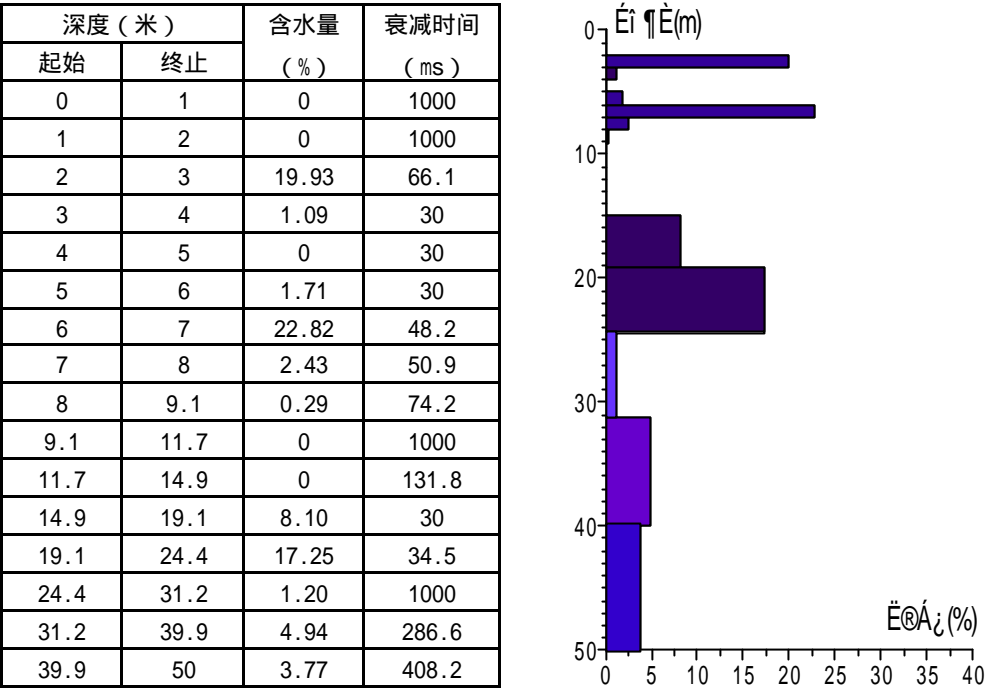


图 27 子洲县大理河河谷区核磁共振测量结果

碎屑岩类孔隙裂隙水

鄂尔多斯白垩系自流水盆地地层岩性包括泥岩、粉砂岩、细砂岩、中粗砂岩、砂砾岩等，含水层上下叠置，横向相变大。一般粗粒类砂岩裂隙发育、富水性强、地下水矿化度低，但随胶结物成分不同变化较大。物探勘查的主要目的是了解白垩系岩性结构变化和地下水水质分布特征。由于勘探深度大(大于 600m)，选用音频大地电磁测深法勘查地下水较为适宜。

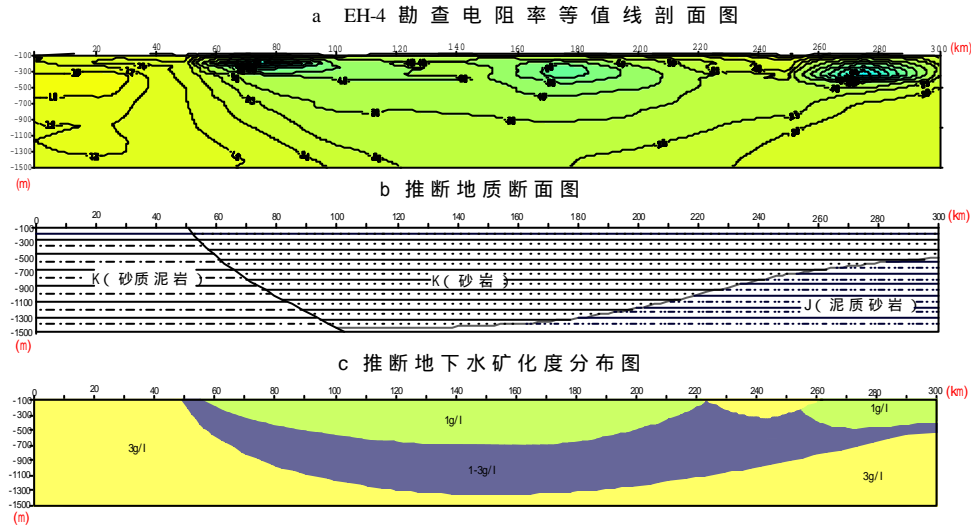


图 28 鄂尔多斯高原区白垩系地下水电磁法勘测结果

图 28 为鄂尔多斯盆地北部高原区勘查结果。很清晰地查明了地层结构和地下水矿化度变化特征。图中 b、c 为推断地电断面和地下水水质分布断面图。

通过上述实例分析可以看出，在深层碎屑岩地下水勘查中，音频大地电磁测深法对划分地下水矿化度分布特征效果明显，但要详细地划分地层结构较为困难。原因是砂、泥质岩互层间电性差异不甚明显，加之地下水矿化度对电阻率的影响起主导作用，因而地层结构的划分应结合地震勘探技术。

基岩裂隙水

会宁地处秦岭纬向构造体系与陇西旋卷构造体系的复合部位，祁吕贺兰山字型构造西翼“盾地”，地质构造复杂、褶皱、断裂发育。从总体构造形迹看，会宁属第三系凹陷盆地，盆地内断裂带主要有华家岭北麓 - 暖泉深大断裂。工作区位于该断裂带南部的华家岭隆起带上，发育有一系列次级褶皱和断裂。碳酸盐岩溶隙、裂隙水主要赋存于震旦系中浅变质大理岩、灰岩之中，以接触面裂隙和构造裂隙为主，溶隙发育，富水性好，水质好，在补给与构造条件较好地段可形成较丰富的地下水源。因此，本次工作重点布置于龙王峡采石场与大湾口大理岩、灰岩出露部位，并以确定构造裂隙和接触面裂隙发育带为主。

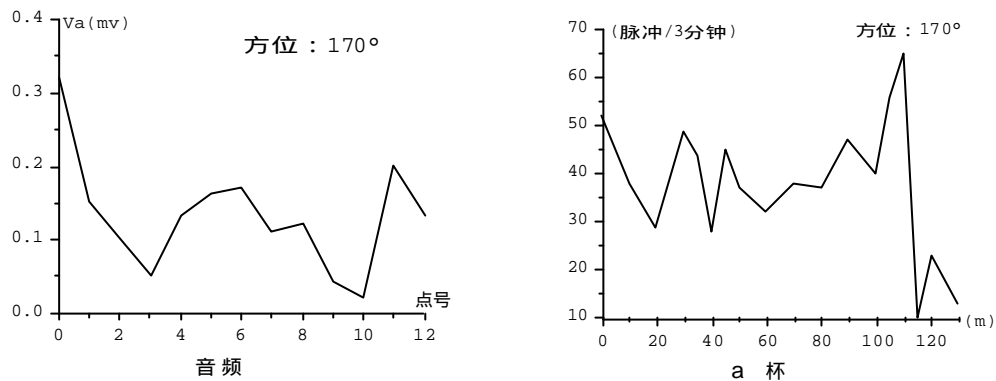


图 29 大湾口音频大地及 杯曲线

物探工作主要是准确查明基岩构造的裂隙发育程度、空间分布特征、确定宜孔位置。难点在于准确判定构造水平位置、了解断层性质产状，分析其对地下水的控制作用，在弄清楚断层产状性质的基础上，确定孔位。选用的方法包括音频大地电场法，EH - 4 电导率成像系统以及 杯测量法。图 29 为大湾口音频大地电场、 杯勘查结果图。查明了构造水平分布位置。图 30 是相应地段的 EH - 4 电阻率断面图，图中剖面 30m 和 100m 处的低阻异常带，均明确地反映了灰岩两侧岩石破碎富水的特征，且与上述两种方法异常完全吻合。

由上述资料推断分析，将大湾口 ZK₁ 钻孔布置于音频曲线 10 号点，终孔孔深 200.15m。经大流量开采试验确定，单井最大出水量 2313.50 m³/d，水质良好，无污染，矿化度 1.13g/L，基本满足国家生活饮用水水质标准。另外，在龙王峡采石场布设的第二眼 ZK₂ 探采孔，终孔孔深 340.21m，单井最大出水量达 5000 m³/d。获得了在甘肃中部严重缺水地区找水的重大突破。

岩溶水

鄂尔多斯周边岩溶区地下水分为深埋岩溶水和浅埋岩溶水。深埋岩溶水主要分布在渭北旱腰带及宁南地区，浅埋岩溶水主要分布在内蒙桌子山等地区。深埋岩溶水受隐伏构造的控制，物探要解决的主要问题是确定灰岩界面埋深，查明岩溶构造的空间分布特征，确定宜井孔位；浅埋岩溶水地质构造分布复杂，物探要解决

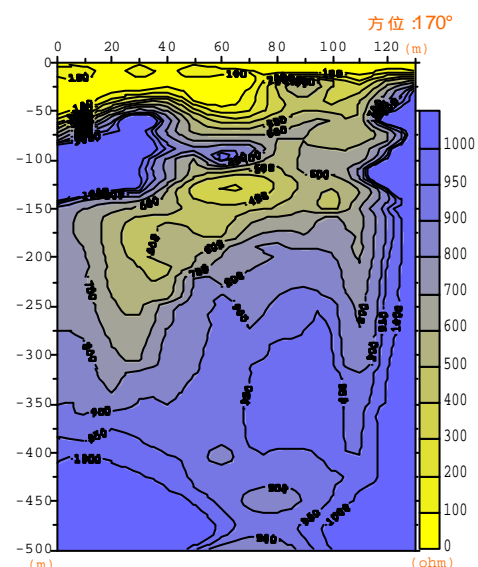


图 30 大湾口 EH-4 勘查剖面

的主要问题是查明构造的分布规律及空间分布特征，判断其控水作用，确定宜井位置。下面就两种类型应用实例予以总结。

、宁南“南北古脊梁”深埋岩溶水

宁夏南部山区处于鄂尔多斯盆地西缘，位于中国东西部两个不同性质的地质单元的衔接地带。在该区域，由震旦系、寒武系、奥陶系组成的宽约 30 余公里的“南北古脊梁”两侧受基底断裂控制，地质构造分布不均且较复杂。根据前人资料该区域地下赋水构造埋深较大，通常约 400-600m。因此，宁南山区地下水的勘查目标是深埋岩溶水。物探工作的难度很大，主要表现在以下几个方面：其一宁南地区多为黄土丘陵区，黄土覆盖巨厚，沟谷纵横，切割严重，水位埋深大，常规的方法需要一定的场地，且易受地形影响，同时供电困难问题不易解决，因此难以满足勘查要求；其二是由于勘查目标是深埋构造，对构造空间分布特征需要详细查明，也就是说需要对深层地质信息有较高的分辨率。这种地貌的特殊性也决定着对地下水勘查技术的特殊要求。单纯的一种或两种物探勘查技术在该区域进行深层岩溶水的勘查都不会圆满地解决问题，需发挥物探技术各自的特点，发挥综合物探的技术优势，提高勘查结果的准确性和可靠性。

因此，本次物探技术方法选择是在充分考虑地质、地貌条件及宁南深层地下水勘查的特点的基础上，根据不同的地球物理场特征而选择的，采用多种物探手段组合开展研究。选择的技术方法有：EH-4 电导率成像法、瞬变电磁测深法、高分辨率浅层地震法及放射性法(杯法)。这些方法中既有过去很成熟的方法，又有先进的新技术、新方法。

工作点选择在宁南同心县下马关地区。根据前人资料，地层情况是：第四系岩性为干黄土层，下伏第三系岩性不明。基岩为奥陶系的平凉组（岩性以砂岩为主）和马家沟组（岩性为灰岩）。多种物探方法技术组合勘查结果见图 31。根据勘查结果推断：

地层结构特征：下马关白家滩地区地层大致可划分为三个大层，50m 以上为干燥黄土覆盖或冲积物；第二层 50m 至 80 - 160m 左右为略为潮湿的黄土层；第三层 80 - 160m 以下为基岩地层，其中 80 - 160m 至 250 - 400m 为奥陶系砂岩；250 - 400 m 以下为奥陶系灰岩。

基岩构造特征：从下伏基岩第三层的电阻率畸变特征可以看出，青龙山西侧基岩向下马关盆地方向呈阶梯状下降，大致可分为两个阶梯，剖面沿测线方向 0 - 600m 为第一台阶，基岩埋深 100 - 150m 左右；剖面 600 - 1200m 为第二台阶，基岩埋深约 200m 左右。其中第一台阶存在一个次级凹陷。根据综合勘查结果推测基岩构造特征见表 13。

表 13 下马关白家滩地区推测断层特征表

编号	性质	倾向	倾角	断距
F ₁	正断层	西	74 °	20 - 99m
F ₂	逆断层	东	58 °	10 - 22m
F ₃	正断层	西	75 °	
F ₄	正断层	东	75 °	

根据勘查结果，结合工作点的水文地质条件认为：该地区第四系以下，剖面位置 600 - 1190m 左右，岩石破碎程度高，构造较为发育。对确定孔位来讲，以寻找主构造的次级构造为主。因此，该地区地下水孔位应以 F3 次级构造为目标，在平面位置上应位于 620m 左右，孔深度在 600m 以内，在深 450 - 500m 左右，预计可见断层构造。

经钻探该井成功出水且日出水量大于 3000m³，是该区出水量最大的一口井，也是该区域地下水勘查的一大突破，所揭露的地层与勘查结果推断结构基本吻合，充分证实了上述四

种方法组合可以作为宁南深层岩溶水勘查的一种有效、合理的技术模式。

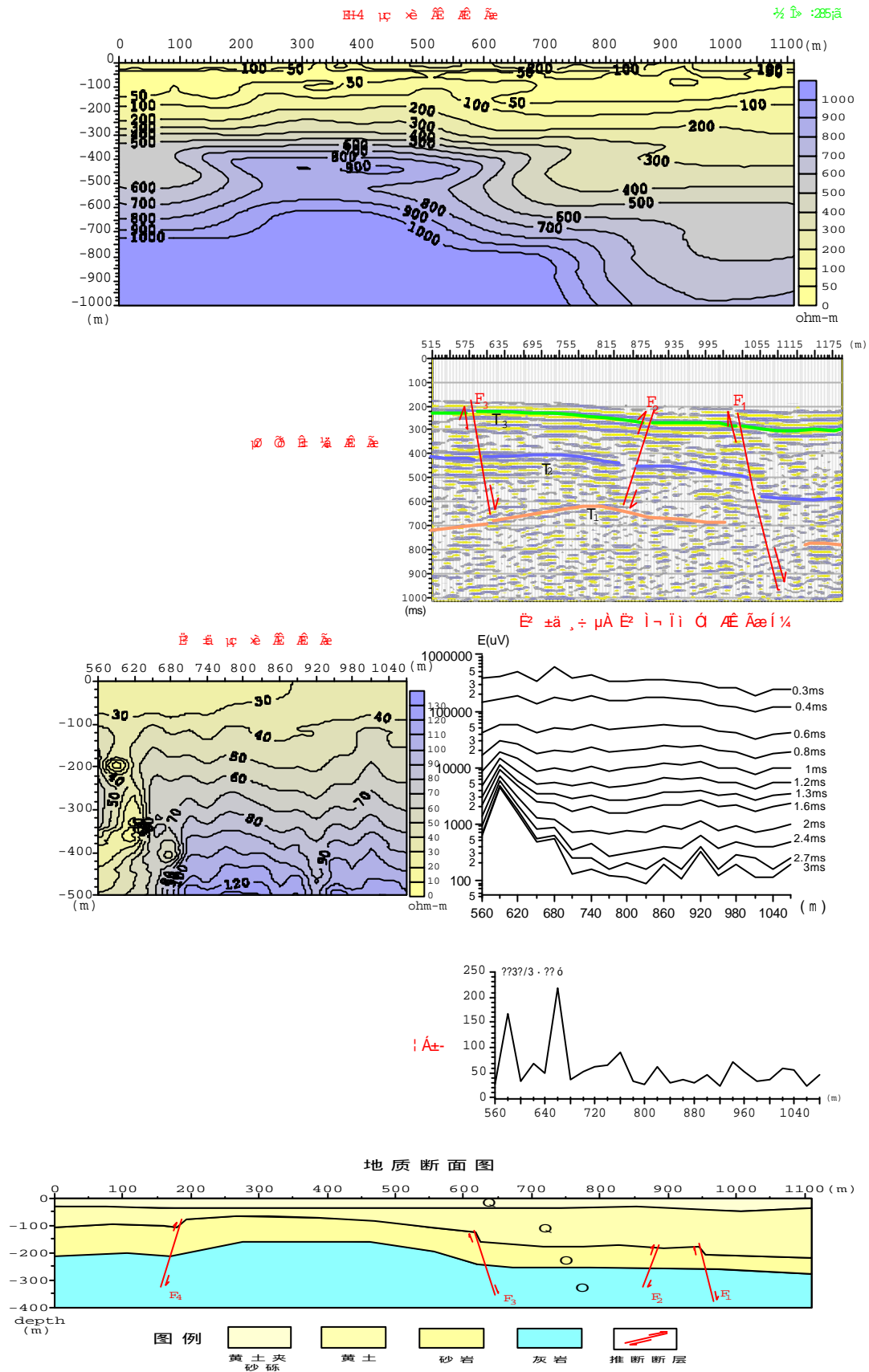


图 31 宁夏同心县下马关地区多种物探组合试验成果图

、内蒙古棋盘井浅埋岩溶水

桌子山地区主要地层是白垩系泥质砂砾岩、二叠系砂岩夹泥岩、石炭系砂岩夹泥岩和煤层以及奥陶系灰岩。奥陶系灰岩中发育有溶洞、溶槽、溶渠等，是地下水的良好聚集处，且灰岩属脆性岩石，在构造作用下，灰岩破碎程度高，极易形成大量的裂隙带，这些裂隙带是贮水的有利部位。

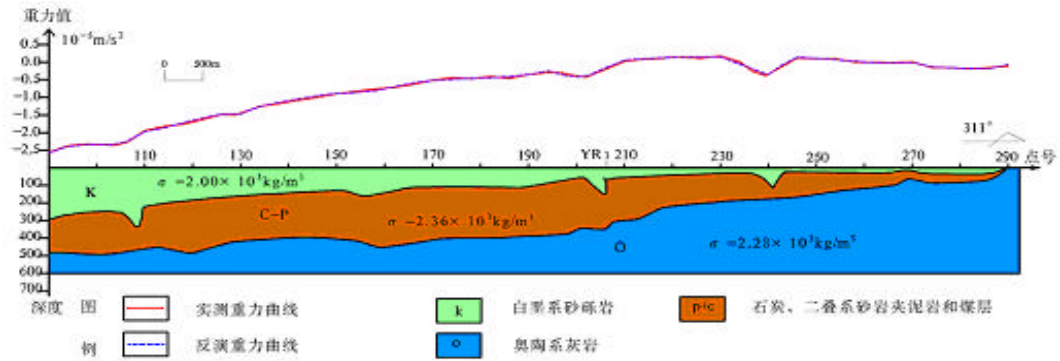


图 32 桌子山地区 剖面重力测量综合图

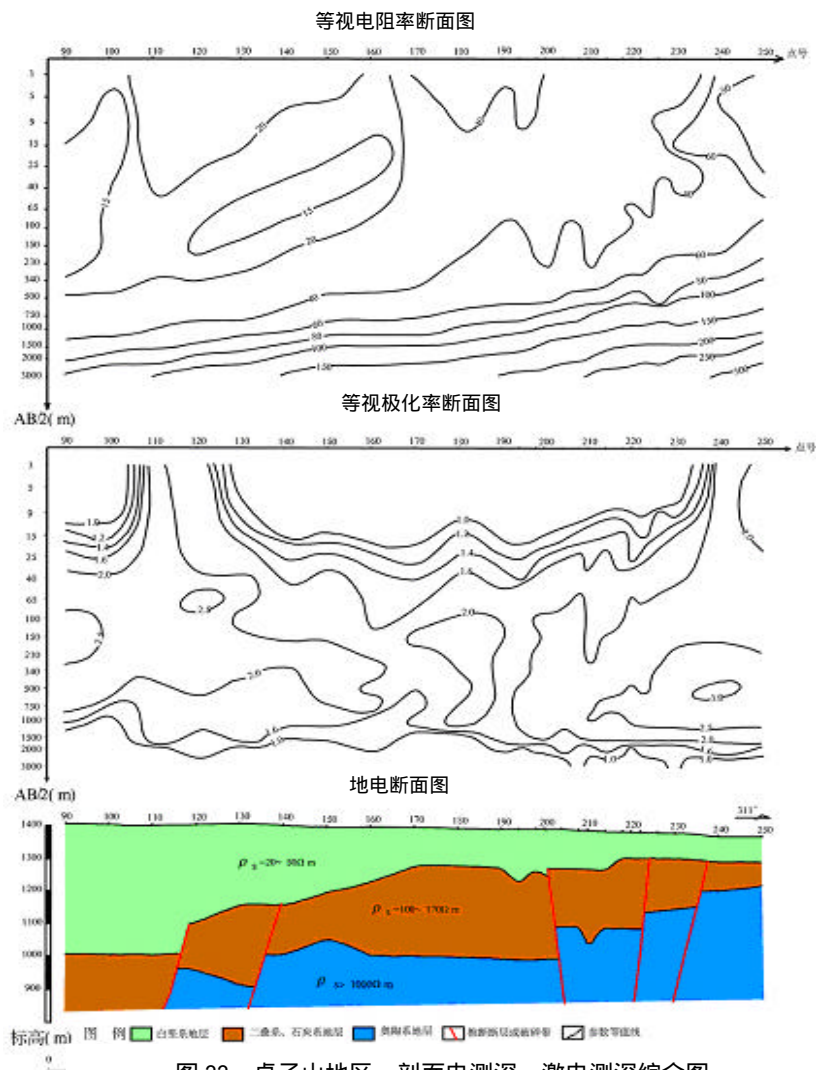


图 33 桌子山地区 剖面电测深、激电测深综合图

据区内地质资料推断认为，由于受多期构造的作用，区内的构造形迹极为复杂，地表很难划定构造的位置。因此，确定这些隐覆断层就是物探勘查的首要任务。因此，根据区内各地层岩性的地球物理特征，投入电法、地震法、重力等方法圈定隐伏断裂带的位置，达到寻找岩溶水的目的。

图 32、33、34、35 分别是重力、电测深和激电测深、联合剖面法和浅层地震勘探法勘查结果。通过对综合物探异常特征解释认为，在灰岩深埋区图 40 剖面上的 200—220 点之间存在 F_{27} 、 F_{28} 两条正断层，倾角约 $70 \sim 85^\circ$ ，且 F_{27} 倾向南东， F_{28} 倾向北西，埋深约 340m。 F_{27} 宽约 20m， F_{28} 宽约 105m，两条断裂都含水，但 F_{28} 规模较大，富水性相对好。据此，在 F_{28} 上的 204 点附近布置了水文地质勘查孔 YR₃。

钻孔结果表明：0~152.09m 是白垩系地层，152.09~350.81m 是石炭、二叠系地层，350.81m 以下是奥陶系灰岩。其中在 229~326.92m 之间和 356.38~418m 之间构造裂隙（或富水岩溶带）较发育，最大裂隙厚度为 15m，最小也有 2m。钻探结果与综合物探解释推断结果吻合较好，证实上述综合物探方法的科学合理应用是该区深埋岩溶水勘查行之有效的手段。

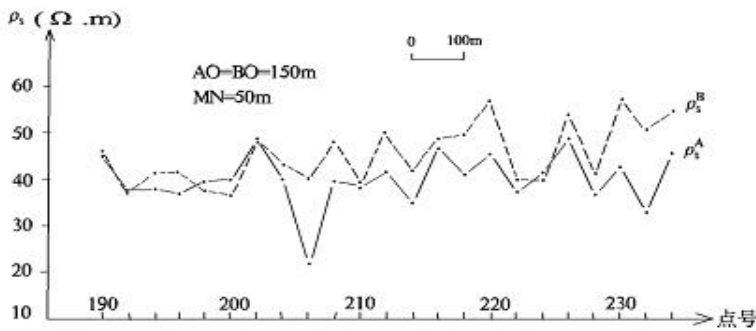


图 34 联合剖面图

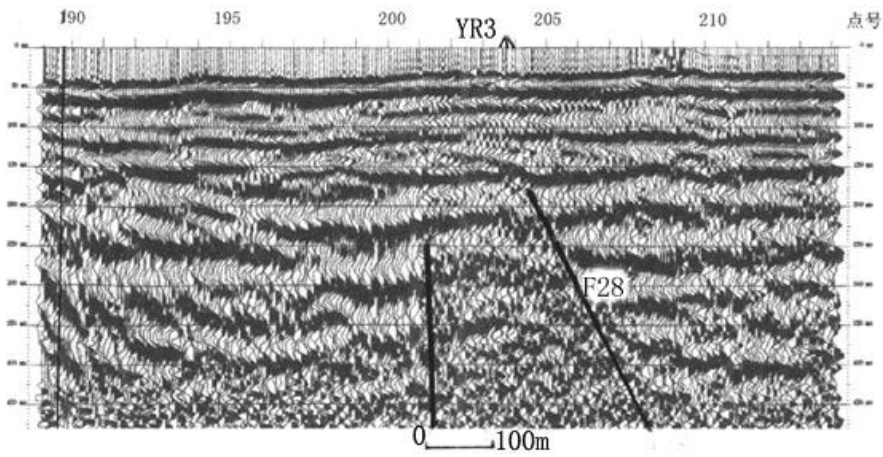


图 35 桌子山地区 剖面地震反射波时间剖面图

通过上述不同地质单元贫水区中寻找富水地段的物探技术模式分析，可总结出以下几点结论；

(1) 西部地区地下水的地球物理勘查采用综合手段是非常有效的一种方法，其准确性

和可靠性都有所提高，能取得令人满意的结果。

(2) 西北地区地下水的地球物理勘查要根据不同的含水类型和特点选取合理有效的物探技术及其组合，才能很好的解决有关的地质问题。

西北内陆盆地山前深埋带地下水勘查采用电磁测深法和瞬变电磁测深法，可以准确查明山前深埋带地下水水位埋深、断裂构造性质、产状以及控水作用，对确定宜井井位有极大的帮助。

陕西黄土区松散类孔隙水勘查常规的直流电测深法、激发极化法的组合能有效地圈定地下水富集地段，是一种经济有效的综合勘查手段。在条件允许下，采用核磁共振新技术，能更准确地判断地下水富水性，效果更好。

基岩构造裂隙水（含岩溶构造裂隙水）的勘查关键在于准确查明构造空间分布特征，了解断层构造的产状性质以及对地下水的控制作用。采用物探新技术（EH-4 电导率成像系统、瞬变电磁测深法、高分辨率地震）与常规方法（音频大地电场法、杯法、直流电测深法、重力）的组合，效果十分明显。但该类地下水勘查应注意的问题是：

对于基岩构造裂隙水勘查，要分析清楚断层的规模与性质。当断裂带规模较大或呈压性时，一般不含水或者含水很少，往往次级构造富水。

西部地区大部分地下水水位埋深较大，基岩构造裂隙水勘查必须采用以勘探深度较大的如频率域电磁测深法、瞬变电磁法、地震勘探等新技术新方法为主，其它常规方法为辅的组合模式。

(3) 新技术新方法的应用保证了西部严重缺水地区地下水勘查取得高质量的成果。

核磁共振找水新技术、音频大地电磁测深法、瞬变电磁法、浅层高分辨率地震法等对勘查一些特殊景观区、地质条件复杂区的地下水具有明显成效。为这些困难地区地下水勘查提供了新的勘查手段。

(4) 不同地质单元贫水区中寻找富水地段，除了选择合理有效的地球物理勘查方法外，物探勘查结果解释与区域地质、水文地质资料的有机结合是保证地下水勘查成功很重要的一个环节。

(三) 分析总结了西部严重缺水地区、漏失严重地层、大漂砾石地层等开采地下水困难地层条件下地下水开采钻探和成井工艺新技术新方法，为这些开采地下水困难地区提供了技术保证

在西部严重缺水地区，常规钻探技术在很多地区存在着不少技术难题，特别是在厚度大的砂卵砾石层、漂卵砾石层、构造破碎带、裂隙和溶洞发育的岩溶地层钻进更为困难等，一系列问题，要求选择适合特殊地层的钻探新技术，提高钻探效率、降低成本。

1、各种钻进新技术方法原理、适用范围及主要优点

(1) 空气潜孔锤钻进技术

空气潜孔锤钻进是把破碎岩石的钻头和一个能产生冲击的气动冲击器潜入孔内进行钻进的一种技术。气动冲击器以压缩空气为动力，产生的冲击能量直接传给钻头，同时钻机带动钻头回转，形成对岩石的破碎，利用冲击器工作后排出的压缩空气对钻头进行冷却和携带钻进时刻取的岩屑，从而实现冲击回转钻进。

(2) 空气潜孔锤反循环钻进技术

空气潜孔锤反循环钻进可分为：普通潜孔锤双壁钻杆反循环和贯通式潜孔锤双壁钻杆反循环两种形式。

普通潜孔锤双壁钻杆反循环钻进技术：压缩空气从双壁钻杆内外管间的环状间隙进入，经分流接头把压缩空气输入冲击器，驱动冲击器工作破碎岩石。排气经交叉接头引入双壁钻杆的内管排出孔外。

贯通式潜孔锤反循环钻进技术：压缩空气从双壁钻杆内外管间的环状间隙进入冲击器，驱动贯通式冲击器工作破碎岩石，排气经钻头的引导进入双壁钻杆内管排出孔外。普通潜孔锤和贯通式潜孔锤反循环钻进示意图 36 所示。

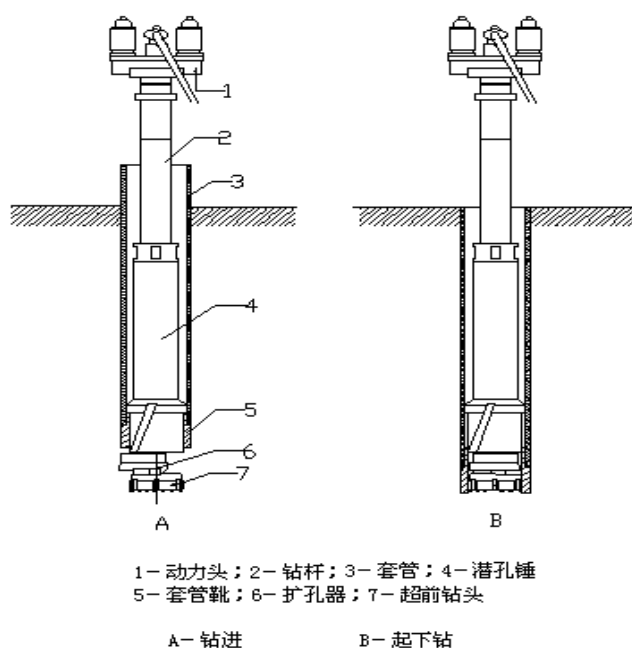


图 36 普通潜孔锤和贯通式潜孔锤反循环钻进示意图

(3) 空气泡沫潜孔锤钻进技术

空气泡沫潜孔锤钻进是在向冲击器内输送压缩空气的同时，通过泡沫泵向空气中注入一定数量的发泡剂，使洗井介质在循环中产生大量而稳定的泡沫的钻进方法。

(4) 泡沫增压泵钻进技术

该技术是西部严重缺水地区地下水勘查示范过程中，针对我国西北地区地下水埋藏较深，地质条件复杂；钻探施工现场严重缺水，采用泥浆钻探，孔内漏失严重，为此常发生埋钻和卡钻事故等钻探难题而首创的新型钻探技术方法。泡沫增压泵是由改装的水泵和低压空压机，再配上一台向水泵灌注泡沫液的灌注泵而构成的压送气液混合物的特殊压送系统。增压泵吸入泡沫混合液体和低压压缩空气，将吸入的泡沫混合液体和低压压缩空气进行二次压缩增压，使其达到钻进所需的压力后，与泡沫液一起送至孔内，进行空气泡沫钻进。泡沫增压泵可将 0.7MPa 的低压空气增压到 7 - 8MPa。

(5) 气举反循环钻进技术

该钻进是利用气举泵的工作原理实现冲洗液从孔底经钻杆内腔、水龙头到泥浆池，再由泥浆池经井身回到井底的循环流动，利用冲洗液在钻杆内的流动将钻头从孔底破碎下来的岩屑携带到地面上来，从而实现钻进的目的。气举反循环钻进工作原理图如图 37。

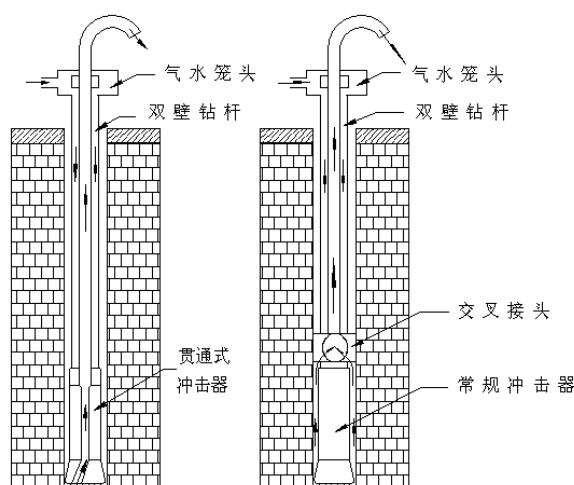


图 37 气举反循环钻进工作原理图

(6) 空气潜孔锤与气举反循环组合钻进技术

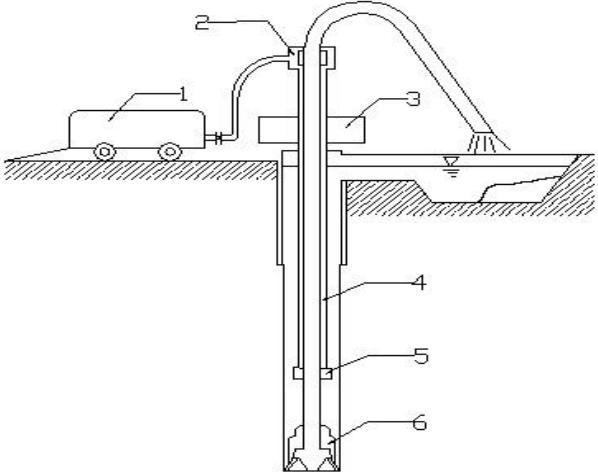
该组合钻进技术是适应西部地区基岩水井含水层较深，承压水位较浅，而上层非含水层几乎为“干孔”的情况下，发展起来的一种新型钻探技术方法。先用空气潜孔锤钻进技术完成上部孔段施工，在无须施工供水的情况下获得较高的钻进效率，揭开含水层。待地下水位升起来后，换用气举反循环钻进工艺，同样在无须施工供水的情况下，获得较高的钻进效率。

(7) 充气泡沫泥浆钻进技术

用优质粘土泥浆和泡沫剂配成混合液体，注入空气钻进的气流中，成为充气泡沫泥浆的钻进方法。

(8) 空气潜孔锤同步跟管钻进技术

空气潜孔锤同步跟管钻进是借助冲击器的冲击能，在潜孔锤钻进的同时，套管随钻头下入孔内的钻进方法。空气潜孔锤跟管钻进示意如图 38。



1—空压机；2—气水笼头；3—转盘
4—双壁钻杆；5—气水混合器；6—钻头

图 38 空气潜孔锤跟管钻进示意图

(9) 异步跟管钻进技术

异步跟管钻进技术是先用硬质合金钻具、牙轮钻具、潜孔锤或者其它种类的钻具进行破岩钻进，而后下套管隔离，再换用小一级钻具在套管内继续钻进的一种钻进方法。

(10) 微型钻机钻进技术

该钻进技术是为适应西南红层丘陵地区浅井钻探的需要而创立的新型钻探方法。西南红层丘陵地区浅井钻探技术有如下特点：

- 井（孔）浅。井深大多在 20 - 30m 之间，一般 15 - 20m。
- 钻探设备、器具和工艺技术要求高。
- 要求钻探设备必须小型轻巧、便于拆迁搬移外、操作容易，且具有一定的钻探进度。
- 成井技术要求严格。

微型钻机钻进技术由微型钻机、特制钻杆和专用钻具组成。其中，微型钻机主要由 195 柴油机、简易机架、一对伞齿轮（减速）、方孔驱动机构（包括方钻杆）、轻便井架等组成。采用清水或泥浆冲洗液循环、滑轮和钢丝绳压钻杆加压钻进。钻杆直径 $\varnothing 38$ ，钻头为三翼硬质合金钻头。表 14 给出了各种钻进新技术适用地层及主要优点。

表 14 各种钻进新技术适用地层及主要优点

钻进技术	适用地层	主 要 优 点
空气潜孔锤钻进技术	基岩地层	<p>1、碎岩效率高、成井周期短。一般情况下，5—6 级岩石的钻进效率可达 10m/h 左右，7 - 8 级岩石的钻进效率可达 5m/h 以上，比常规回转钻进提高几倍甚至几十倍。</p> <p>2、成井质量高，完井后不用再洗井。</p> <p>3、适合于干旱缺水地区钻井，解决了干旱缺水地区钻探施工用水困难问题。</p>

空气潜孔锤反循环钻进技术	完整和非完整基岩地层、卵砾石地层和复杂的破碎、漏失地层。	<p>1、上返风速高，排屑能力强，避免孔底重复破碎，钻进效率提高。</p> <p>2、排渣效果不受钻孔孔径的限制，适合于较大直径钻孔钻探。在水井成井中可以一径成井，改变了过去小径打，大径扩的施工方法，施工工序简化，钻进效率提高，施工工期缩短。</p> <p>3、钻进过程中气、液、固三相流上返速度高，且上返流体不与孔壁接触，岩样连续清晰，便于准确判定地层变化。</p> <p>4、钻进过程又是抽水洗井的过程，成井后不必洗井。可避免岩粉堵塞含水层通道，成井质量高，水井出水量增加。</p> <p>5、潜孔锤反循环钻进可实现泥浆护壁、反循环排渣、高效潜孔锤钻进的效能，可在复杂地层中钻进。</p> <p>6、有利于防尘和防止污染，改善工作环境，防止机械磨损。</p>
空气泡沫潜孔锤钻进技术	<p>1、地层漏失严重，特别是潮湿或渗水地层。</p> <p>2、严重坍塌的水敏性岩层。</p> <p>3、适应于因经济、距离远或地理位置等因素而造成的气量供应不足等情况的地区。</p>	<p>1、可节省风量；</p> <p>2、保护孔壁，破碎坍塌地层易于通过；</p> <p>3、空气泡沫的比重比水小得多，再加上活性物质的其它性质，对解决空气潜孔锤钻进工艺中所遇到的捕尘、解尘、降低水压力、增加悬浮能力与携带岩粉的能力、润滑钻具等具有良好的效果。空气泡沫潜孔锤钻进最突出的优点是所需空气量少。</p>
泡沫增压泵钻进技术	<p>1、完整基岩和非完整基岩地层。</p> <p>2、非固结地层，如砂、页岩、卵石和砾岩等。</p> <p>3、严重漏失地层</p> <p>4、严重坍塌的水敏性地层，如泥岩、页岩等。</p>	<p>1、利用低压空压机可实现深孔泡沫钻进，钻进深度达 1000m 以上。</p> <p>2、可减少设备投入，节省使用成本。</p> <p>3、泡沫携带岩粉能力强，孔底干净，避免了重复破碎，可大幅度提高钻进效率。</p> <p>4、泡沫钻进可大大减少裂隙和空洞地层中空气的漏失；另外泡沫钻进要求上返速度低，因此，泡沫钻进时其风量可比纯空气钻进减少近 20 倍，动力消耗也比空气钻进时要低。</p> <p>5、泡沫有一定润滑与减阻作用，有利于减少钻具的磨损和减振，可允许钻杆高速回转，加之孔底干净，可延长钻头的寿命。</p> <p>6、对于孔内复杂情况，比空气钻进有更大的适应性。在严重漏失、涌水、坍塌地层均能顺利地进行钻进。</p>
气举反循环钻进技术	<p>1、砂、粘土、卵砾石地层和部分基岩地层。</p> <p>2、大直径水井。</p> <p>3、较深的水文地质勘探孔和水井。</p>	<p>1、冲洗液能携带大颗粒岩屑，减少重复破碎，从而提高机械钻速。钻进大口径钻孔，气举反循环钻进与正循环钻进相比，机械钻速可提高 10 倍以上。</p> <p>2、冲洗液上返速度快，携带的岩心和岩屑上返速度也较快，岩心（样）采取率达 100%。气举反循环钻进是连续取心（样）钻进，可大幅度地提高纯钻时间利用率。</p> <p>3、气举反循环钻进可用于钻进深度较大的孔，钻进深度可达 1000 米以上。与空气潜孔锤钻进相比，因空气潜孔锤钻进深度受孔内水位深度和空压机压力的限制，钻进深度较浅，气举反循环钻进则适用于钻进富水地层的深水井。</p> <p>4、气举反循环钻进时，如果孔壁稳定，地下水补给充足，可以直接利用地下水作为循环液，简化或不配置泥浆系统。</p>

		<p>5、气举反循环钻进使用的空压机能力较小，能耗降低。</p> <p>6、气举反循环钻进时，岩屑不会渗入含水层，能保持含水层的孔隙率。较泥浆正循环钻进单井出水量可提高 20% 左右。</p> <p>7、气举反循环钻进时，钻头在净化后的冲洗液中工作，工作条件优于正循环钻进，钻头使用寿命延长。</p> <p>8、气举反循环钻进可解决一些复杂地层的钻进难题。钻进漏失地层时，只要孔内有一定的水位就能维持冲洗液循环，解决了正循环钻进因冲洗液漏失，不能循环无法继续钻进的难题。</p>
空气潜孔锤与气举反循环组合钻进技术	适应西部基岩水井含水层较深，承压水位较浅，而上层非含水层几乎为“干孔”的地区。	<p>1、成井周期短。由于空气潜孔锤钻进技术和气举反循环钻进技术均属于高效钻进技术，两种高效钻进技术组合在一起可获得较高的钻进综合效率，从而使成井周期缩短。</p> <p>2、钻孔垂直度好。深孔钻进中防止钻孔倾斜是钻进施工的重要环节，它既费工又费事。由于空气潜孔锤钻进技术具有“小压力，慢转速”特点，气举反循环牙轮钻进工艺又具有“孔底加压，悬锤钻进”特点，不用过多注重防斜环节，就能使钻孔的垂直度较高，一般孔斜度不超过 $0.5^{\circ}/100\text{m}$，在完全满足水文水井孔斜度要求的同时，确保下管、止水工艺顺利进行，同时为换径后的安全、高效钻进提供有力保证。</p> <p>3、钻进成本低。由于钻进效率高，成井周期短，钻进过程中的人员工资、油料消耗、电费消耗均较少。另外，由于成孔质量好，大幅度减少了辅助作业工序，从而极大地减少辅助作业造成的消耗。</p> <p>4、钻进与洗井同时进行，洗井效果好，利于增加出水量。空气潜孔锤钻进和气举反循环钻进均有边钻进边洗井的作用。特别是气举反循环钻进，因其携带岩屑的流动方向与正循环相反，钻杆中的上返流速远大于钻杆外环状间隙流速，能在孔底形成抽吸负压，在有效携带岩屑的同时，可将地层裂隙中的堵塞碎屑清除，有利于疏通地下水通道，出水量增大。</p> <p>5、减少盲目钻探工作量及洗井工作量。下部反循环钻进时返出的水量实际上反映了孔内的出水量，因此可随时了解地下水的赋存情况，从而减少盲目钻探工作量及洗井工作量。</p> <p>6、施工用水少。空气潜孔锤钻进和气举反循环钻进均以空气作为循环介质。在施工中，几乎无须施工供水，采用空气潜孔锤钻进时，配制泡沫剂需要少量的水，采用气举反循环钻进时，若孔内出水量小，水位不能保持，沉没比不足时，需要往孔补少量的水，保持反循环形成。</p>
充气泡沫泥浆钻进技术	<p>1、粘土层、卵砾石层。</p> <p>2、地层孔隙多或地层十分破碎，泥浆钻进漏失严重地层。</p> <p>3、用空气钻进孔内出现大量涌水的地带。</p> <p>4、孔壁易被冲刷的孔段。</p>	<p>1、循环介质比重低，可减轻循环介质对含水层的堵塞，增加水井出水量。</p> <p>2、上返流速低，可减少对孔壁的冲蚀。</p> <p>3、空气用量少，可节省功率消耗，降低钻进成本。</p> <p>4、充气泡沫泥浆有较强的悬浮、携带岩屑能力，孔底干净，可提高钻进速度，延长钻头使用寿命。</p> <p>5、充气泡沫泥浆钻进时，可在孔壁形成薄而不透水的泥皮，有利于保护孔壁。泥皮薄可减少成井后的洗井工作量。</p>

空气潜孔锤同步跟管钻进技术	1、漂卵砾石地层。 2、破碎、坍塌地层。	1、钻进、排渣、护壁 3 个工序同步进行。 2、充分发挥潜孔锤碎岩效率高的优点，克服空气护壁性能差的缺点。 3、跟进的套管具有稳定孔壁和保护孔口的作用。 4、在地下水埋深较浅、水量丰富的漂卵砾石地层，采用空气潜孔锤跟管技术跟进桥式过滤器或条缝过滤器，可实现钻进与成井同步完成。
异步跟管钻进技术	卵砾石地层、破碎坍塌地层、严重漏失地层。	1、可解决卵砾石地层、破碎坍塌地层钻进困难的难题。 2、可解决漏失问题。
微型钻机钻进技术	适用于西南红层丘陵地区浅井钻探。	1、整套钻探系统重量不超过 150Kg，易于搬迁。 2、钻探设备机动性好。 3、使用简便。

2、成井工艺技术

(1) 地下水开采增水新技术

在管井成井中，为增大出水量，传统的方法有活塞洗井、空压机洗井、酸化洗井、多磷酸洗井和液态 CO₂ 洗井等，但对一些特殊情况，这些方法未能取得良好效果。目前新开发的爆破压裂、水锤洗井、高压喷射洗井等增水效果明显，满足了特殊情况的需要。

爆破压裂技术

爆破压裂技术是利用水压爆破原理，通过水做介质，将炸药爆炸时产生的高压能有效地传递给岩层，在强大冲击波作用下岩层形成初始径向裂隙；爆炸形成的高压气体膨胀作用到围岩上，在岩石中产生强大的应力波，不均质部位如夹层、细裂隙等薄弱处在应力波的拉应力作用下，形成许多新的裂纹，同时，也造成岩体中原有裂隙扩展增大，提高含水层的“通透性”，达到增大出水量的目的。

爆破压裂适用条件一是灰岩、大理岩、白云岩、砂岩和花岗岩等硬脆性岩层，且岩层裂隙充填物为岩石碎屑、硬胶结等非泥质物质含水层，爆破压裂效果较好；二是泥岩、泥灰岩和泥砂岩等软、塑性岩层效果较差；三是地层虽为硬、脆性含水层，但裂隙中多为泥质充填物时，爆破压裂效果较差。

水锤洗井技术

水锤洗井是利用“水锤”冲击产生的冲击波破坏吸附在孔壁上的泥皮和固结在人工滤层、滤水管上的粘性颗粒，达到增加渗透性，减少地下水入管（井）阻力，从而增加井的出水量。水锤作用机理如图 39 所示。

当活塞在井内某一位置，让其突然产生上行，然后立即让活塞下行，这时活塞底部便会由其上部水柱压力及惯性水头形成象“锤”一样对活塞下部的一次撞击，出现向下和四周的震荡冲击波，这种物理现象称为“水锤”，水锤能量的大小主要由活塞上部水柱高度和下行速度决定。

水锤洗井技术适用范围是：一是适用于松散、破碎地层

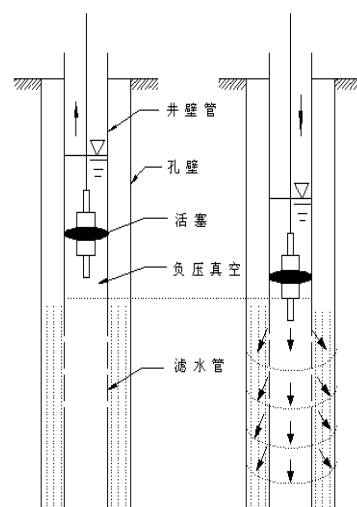


图 39 水锤洗井机理示意图

中的钢管井、铸铁管井、钢筋水泥管井和 U-PVC 塑料管井及基岩裸眼井。二是适用于水量小或“干井”(包括新井和旧井)。

高压水喷射洗井技术

特制的喷嘴在高压水（压力达 50 - 60MPa）作用下形成冲刷孔壁（管壁）的喷射流，同时喷嘴在喷射流的作用下高速旋转，以破坏吸附在孔壁上的泥皮、扰动管外的滤料、有效清除管壁上的锈垢，达到有效洗井增加出水量的目的。

该方法适用于钢管（无缝、直缝、螺旋）井、铸铁管井。由于高压喷射流具有较强的破坏力，此洗井方法不宜用于水泥管井和 U-PVC 塑料管井。

(2) 水井建井新技术及建井新材料

建井新材料

为解决传统建井的管材（铸铁管、钢管和水泥管等）不同程度地存在着腐蚀及泥浆易堵塞含水层影响成井后的出水量问题，开发了许多建井新材料。

、U-PVC 塑料井管及滤水管

U-PVC 塑料井管即无增塑聚氯乙烯塑料管。管材力学性能为：冲击韧性达到最大值的 10%断裂，切口冲击韧性 3 - 5kg/cm²，屈服强度 45 - 55MPa，弹性模量 2500 - 3000N/mm²。U-PVC 塑料井管及滤水管如图 40。其具有质量轻、耐腐蚀，无毒无害，达到生活饮用给水管材卫生标准等优点，是理想的水文水井成井管材。



图 40 U-PVC 塑料井管及滤水管

U-PVC 滤水管有横条缝滤水管、竖条缝滤水管和圆孔型滤水管。U-PVC 塑料井管及滤水管连接方式有螺纹连接，塑料焊接，塑料粘接，销接等。U-PVC 井管规格见表 15。

表 15 U-PVC 塑料井管规格

外径 (mm)	内径 (mm)	壁厚 (mm)	连接螺纹长度 (mm)	连接罗螺承受 拉力 (kN)	长度 (mm)			
					1000 (kg)	2000 (kg)	3000 (kg)	4000 (kg)
113	100	5 ₀ ^{+0.7}	55	45	2.58	5.17	7.70	10.23
165	150	7.5 ₀ ^{+1.0}	65	85	5.7	11.4	16.9	22.40
225	200	10 ₀ ^{+1.2}	70	150	10.4	20.7	30.7	40.70
330	300	14.5 ₀ ^{+1.7}	85	200	22.4	44.3	65.5	86.80

、贴砾滤水管

贴砾滤水管是用粘合剂将一定粒径的砾石粘到具有孔隙（圆孔、条缝）衬管上制成的过滤器。根据衬管材质可分为钢衬贴砾滤水管和塑衬贴砾滤水管。贴砾滤水管结构如图 41 所示。



图 41 贴砾滤水管结构

钢衬贴砾滤水管规格见表 16，塑衬贴砾滤水管规格见表 17。

表 16 钢衬贴砾滤水管规格

规格	衬管外径 (mm)	衬管壁厚 (mm)	贴砾外径 (mm)	透水量 (T/h · m)		
				粗砂	中砂	细砂
4"	108	4	148	36.5	28.1	23.3
6"	159	5	199	49.2	37.8	31.4
8"	219	6	259	67.5	49.2	40.7
12"	325	10	375	92.98	71.1	59

注：透水量是指在地面无压情况下，每米贴砾管每小时渗透清水的数量。

表 17 塑衬贴砾滤水管规格

衬管外径 (mm)	衬管壁厚 (mm)	贴砾外径 (mm)	单根长度 (m)	连接方式
110	5.7	159	1.5	销连接或螺纹
160	7.7	205	1.5	销连接或螺纹
200	9.6	257	1.5	销连接或螺纹
250	11.9	305	1.5	销连接或螺纹
315	15	404	1.5	销连接或螺纹

贴砾滤水管具有滤水性能好，阻砂可靠，降低成井成本，使用方便等优点。

、桥式滤水管

桥式滤水管主要结构是在钢制管体上用冲压法制成带有凸起的小桥、并在管体轴向交错排列，其过水断面在小桥的两侧，下入孔内起滤水作用。桥式滤水管连接方式有对焊接式，套焊接式，螺纹连接式。桥式滤水管结构如图 42 所示。

桥式滤水管主要有如下特点：

有效缝隙大，透水性能好。滤孔缝隙加工精度高。质量轻、强度大。应用范围广，使用寿命长。

、灌浆止水材料

灌浆止水材料以水泥为基料，以高强度材料为骨料，辅以高流态、微膨胀、高抗渗及调凝剂等物质，具有快硬、高强、高抗渗、不收缩、无毒害、高流动性、抗离析和抗水稀释等特点。其性能如下：

凝固时间可调：初凝时间 15 分钟至 2 小时任意调节，终凝时间 5 小时。

早强：灌浆一天抗压强度 35 - 50MPa，三天 40 - 60MPa。

高流态：灌浆流动度 280mm，实现自流平灌浆。

微膨胀性：膨胀率 0.02%。

抗渗性：渗透系数小于 $0.129 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 。

无毒、无污染、无腐蚀性。

抗离析及抗水稀释性：可在水中灌注不被稀释。

、遇水膨胀橡胶止水带

遇水膨胀橡胶止水带是用遇水膨胀橡胶加工而成的专门



图 42 桥式滤水管

用于止水的材料。该止水带在水中可自然膨胀 3 - 5 倍（体积膨胀）。

遇水膨胀橡胶止水带有如下特点：一是遇水膨胀，失水收缩。二是遇水膨胀橡胶止水带遇水膨胀后仍具有一定的强度。

、新型水文水井钻进冲洗液

水文水井冲洗液，在钻进中既要起到与其他冲洗液相同的功效，又要具备以下功能：不破坏含水层结构，不堵塞含水层过水通道； 无毒性，不污染水源； 成井后粘度降解，泥皮自破，易于洗井。

建井新技术

、全塑成井

全塑成井是以 U-PVC 塑料井管、U-PVC 塑料滤水管或者 U-PVC 塑料贴砾滤水管为成井管材的成井方法。全塑成井具有如下优点：抗腐蚀性强，耐久性好，使用寿命长；管壁光滑，永不结垢，可保证滤水管部位有良好的过水能力；原料丰富，造价低廉；重量轻，安装运输方便。

全塑成井适合于井深不大于 350m 的松散地层、破碎地层和基岩地层，特别适合地层和地下水具有腐蚀性的地区。成井方法基本与钢管、铸铁管和水泥管成井相同。

、贴砾滤水管成井

贴砾滤水管成井有如下优点：可解决水井的涌砂问题，保证成井质量，减少对抽水设备的磨损。这一点对粉细砂地层成井尤为重要；减少工序提高效率的目的；钻进成本降低；洗井时间减少。

贴砾滤水管适合于卵砾石、中粗砂、破碎带及基岩含水层。细砂、粉细砂及粘土含量较多的含水层应在贴砾滤水管外另填一定厚度的砾料，并做好换浆、破壁和洗井工作。

采用贴砾滤水管成井应注意下列问题：

根据拟选用贴砾滤水管的外径，确定钻孔直径。采用贴砾滤水管不另行填砾时，钻孔直径应比贴砾滤水管外径大 50mm 以上。钢衬贴砾滤水管成井推荐孔径见表 18。

表 18 钢衬贴砾滤水管成井推荐采用孔径

贴砾滤水管规格	4	6	8	12
孔径（mm）	200	250	300	450

应对含水层颗粒进行分析，正确地确定含水层颗粒组成，然后按含水层的颗粒组成合理选用何种粒径的贴砾滤水管。如果选择不当，可能造成水井涌砂或者影响水井出水量。贴砾层粒径与含水层岩性的对应关系见表 19。

表 19 贴砾层粒径与含水层的对应关系

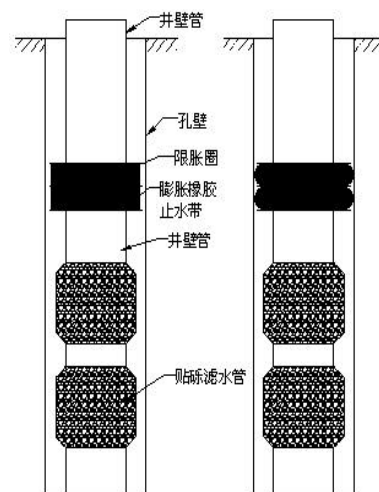
贴砾层粒径（mm）	5 - 3	3 - 2	2 - 1	1 - 0.7
适应的含水层岩性	粗砂	中砂	细砂	粉细砂

孔斜度每百米不得大于 2°。

钻进过程中尽量选用固相含量少，护孔能力高，排屑效果好的优质泥浆。

下管前的冲孔换浆工作需认真进行，必须将孔内的陈泥浆、岩粉、岩屑等彻底换清。

由于不用填砾成井，因此必须采用新方法进行封闭止水。大多数情况下采用遇水膨胀橡胶止水带止水，也可采用橡胶兜的办法止水。采用遇水膨胀橡胶止水带止水时，在需要止水位置的井管上设置膨胀橡胶止水带限胀圈，在两限胀圈之间捆扎膨胀橡胶止水带，其目的是限制膨胀橡胶止水带沿井管纵向方向膨胀，只允许膨胀橡胶止水带朝径向方向膨胀。每一止水位置的止水带设置数量不宜少于 2 道，捆扎膨胀橡胶止水带的层数不宜少于 2 层，两层应分开捆扎，即捆扎好一层后，再在该层上捆扎另一层，接口应与上一层的接口错开。限胀圈由钢板或者厚塑料板加工，限胀圈套在井管上后采用焊接或粘结方式与井管固定，固定时限胀圈面必须与井管轴线垂直。两限胀圈间的间距为 100mm。限胀圈的直径应较井管捆扎两层膨胀橡胶止水带后的外径大 3 - 5mm，以防膨胀橡胶止水带在下管过程中被挂坏。膨胀止水带止水设置如图 43 所示。



止水带膨胀前 止水带膨胀后
图 43 贴砾滤水管成井结构及膨胀橡胶止水示意图

贴砾层较脆，因此，贴砾滤水管在使用和运输过程中，应避免猛力磕碰。长期不用时，应避免露天存放，防止粘合剂加速老化。

止水技术

为了从咸淡水中开采出优质的地下淡水水源，在经钻进取样、物探测井准确判定咸淡水位置的基础上，各地除加强成井止水工作外，还积极采用和开发了一些新型止水技术。

、基岩界面止水方法

该方法主要用于松散覆盖层的水矿化度较高，或者松散覆盖层的水已受污染或者存在潜在污染，需要开采深部基岩裂隙水的供水管井。

止水方法是首先用较大直径的钻具钻穿上部松散覆盖层并深入完整基岩 2 - 3m，清理干净孔底，下比钻孔直径小一级的套管。下管前，在套管底部绑海带辫或者遇水膨胀橡胶止水带，确保套管下至孔底，沿套管与钻孔间的环状间隙下注浆管从下往上灌注水泥浆止水。待水泥浆凝固后，变径施工下部基岩地层。止水结构示意图如图 44。

、基岩地层内部止水方法

该方法主要用于基岩内存在不良含水层的情形。基岩地层内部止水，可采用类似基岩界面的止水方法。但是，大直径钻具钻进基岩不但进尺效率低，而且还容易发生孔内事故。也可采用遇水膨胀橡胶止水带止水，下面着重叙述遇水膨胀橡胶止水带止水方法。采用止水带止水同样需要下套管，只是要求的钻孔孔径较套管、水泥止水要小，且去除了注浆管的准备、水泥浆的搅拌、注浆管的下入和注浆等一系列工序。从而达到了提高钻进效率，简化封闭止水工序，节省成本的目的。用膨胀橡胶止水带后，还可以灌注水泥浆止水，这时膨胀橡胶带主要起“架桥”作用。

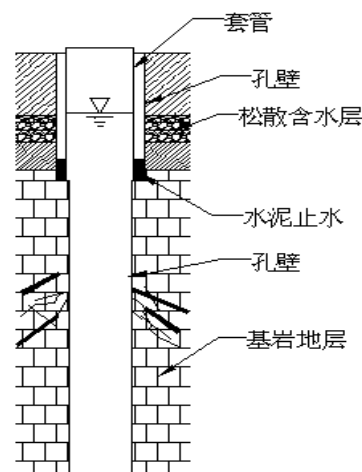


图 44 基岩界面止水示意图

遇水膨胀橡胶止水带止水方法中的限胀圈设置、膨胀橡胶止水带的绑扎见前面的贴砾滤水管成井部分。建议止水段两端（多数情况下仅需止一端）膨胀橡胶止水带的道数不应少于 3 道，捆扎膨胀橡胶止水带的层数不少于 2 层。如果由于孔径限制，捆扎膨胀止水橡胶止水带的层数只能是一层时，膨胀橡胶止水带的道数不少于 5 道。膨胀橡胶止水应设置在孔壁光滑的完整基岩段。膨胀橡胶止水带止水示意图如图 45。

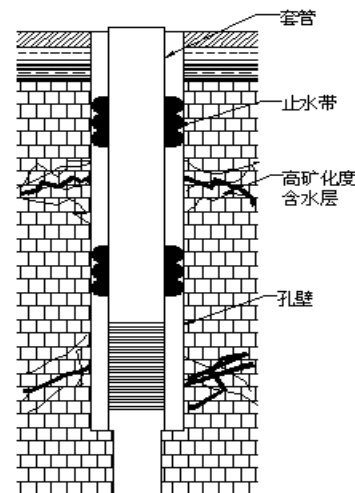


图 45 膨胀橡胶止水带止水示意图

、松散层止水方法

松散地层管井止水方法主要为投砾结束后，用优质粘土球、水泥浆或者粘土球与水泥浆复合进行封闭止水。具有咸淡水交替情况时，采用分层贴砾、分层止水方法。单一采用粘土球或者水泥浆止水的效果不如粘土球与水泥浆复合止水的效果好。粘土球与水泥浆复合止水操作如下：

将优质粘土加工成 20—30mm 的粘土球，并使其表面风干后备用。粘土球可采用人工搓制或机制，加工时应去除粘土中的碎石。投粘土球时应均匀缓慢地进行。围填粘土球的厚度一般不应小于 3m。围填粘土球后，将注浆管沿井管与钻孔间的环状间隙下至粘土球面，采用高压注浆泵注浆，配制水泥浆时，应计算好需要的水泥浆的用量，一次调制好不间断地一次性灌入。灌注水泥浆厚度一般不应小于 5m。水泥浆可以是水泥砂浆，也可采用 GW 型灌浆止水材料配制。水泥砂浆采用 525 号普通硅酸盐水泥配制成 C20—C25 水泥砂浆，为保证水泥砂浆的流动性，水灰比采用 0.45—0.5。止水示意图如图 46。

3、取水工程

在地下水开发过程中，根据不同的水文地质条件和供水目的，设计出科学开采、经济合理的地下水取水方式是解决缺水地区人畜饮水问题的有效途径之一。目前，取水工程主要有管井、渗流井、大口井 - 辐射井、集水廊道（渗渠）和引泉引流等。

（1）管井取水工程

适用条件 适合于含水层厚度相对较大，渗透性能较好、构造相对发育、地下水补给条件较好，有利于形成富水的地段。

关键技术 针对内陆盆地山前平原区存在咸淡水交替，黄土高原区和基岩地区地下水埋深较深以及在某些地方浅部地下水存在严重的污染等，采用管井取水工程关键技术之一是止水技术，尤其是多个层位封闭止水以及深层止水问题。止水效果的好坏直接影响地下水勘查成果，必须加以重视。

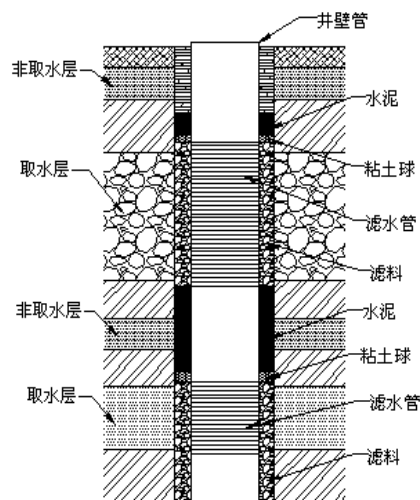


图 46 松散层止水示意图

（2）渗流井取水工程

渗流井是集大口井、集水廊道和辐射孔为一体的综合性水平集水工程。是一种傍河（江、水库）取水技术，它是利用江河（水库）床底部冲积砂卵石层的滤净有效特性、河流的大补给量和自净作用采取江河水或者地下水的方法。

适用条件 适用于河床底部具有排列有序的砂砾石层，并达到一定厚度（4 - 5m）；砂砾石层具有稳定的面积；能生成生物泥膜覆盖于砂砾石层表面或分布于各卵砾石之间，形成天然生物滤膜；有足够量的地下水或源水；河床的水流与渗流能够形成错流。

主要优点：出水量大、使用寿命长、维护方便、运行成本低；水质好、不用增设人工滤层；不仅可以充分截取地下水的潜流，而且可充分激发地表水（河流和水库）的补给；地下水不会产生大面积降落漏斗，避免土地沙化，有利于保护生态环境。

渗流井结构 渗流井由集水竖井、输水平巷和渗流孔群组成。集水竖井傍岸修筑，一般竖井净径 3 - 5m。输水平巷在河床底部垂直河流方向开挖，平巷断面一般 $2 \times 2.5\text{m}$ 。渗流孔直径 110 - 130mm。为不影响天然滤床的结构和性能，渗流井的仰角一般不大于 30°。

（3）大口井 - 辐射井取水工程

大口井 - 辐射井取水技术是在一个具有较大直径和一定深度的竖井底部，沿井壁四周的含水层施工辐射孔（地层不稳定时在辐射孔内安放小直径滤水管或分枝管），通过辐射孔以稳定的流量将含水层中的水集中到大口井中的取水方法。

大口井直径从几米至十几米，深度取决于取水层的深度，最深可达几十米。辐射孔呈辐射状伸展，长度一般 20 - 30m。

适用条件：适用于含水层有一定的厚度，富水性较差的河谷地区。如果建在附近有水源补给的地方效果会更好。

主要优点：施工成本低；集水效率高。由于辐射孔的作用，过水面积增大，出水量增加；维护维修方便。克服了井壁进水孔易于堵塞和不能清理的缺点。

（4）竖井汇流取水工程

竖井汇流取水工程的基本原理是在沿河谷区布置彼此相距一定距离的竖井并排，井排布置方向大致与河流方向平行，井间距 15 - 20m。竖井包括大口径竖井和小口径竖井，各竖井间用辐射孔连通，并在大口径竖井中施工一定数量的辐射孔，使地下水从竖井和辐射孔汇入抽水井内，以增大地下水开采量。其优点是：竖井汇流的建设成本低，取水效果较好。

（5）集水廊道取水工程

集水廊道取水工程适用于河谷区。河谷地段第四系松散层厚度较薄，有利于施工，地下水埋深较浅，集水廊道能有效地增大过水断面，充分截取浅层水的径流，最大限度地集取有限的水资源，提高出水量。

（6）引泉引流取水工程

引泉引流取水工程适用于大泉和泉集河地区。大泉和泉集河流量较大，动态稳定，水质好，无大的洪流产生，水中泥沙含量低，适宜直接在泉口取水或者在支沟口修筑低坝，拦蓄泉集河水，通过管道取水。这种取水工程既经济又不会引发生态环境问题。

（7）庭院分散式和小型集中式供水取水工程

庭院分散式和小型集中式取水工程适用于川、渝红层地区浅层地下水开采。该取水工程是严重缺水地区地下水勘查示范中首创的一种地下水取水模式。其优点：能有效地利用地下水资源解决长期干旱缺水地区人民的饮用水困难，施工工艺简单，建设成本和使用成本低，一般情况下每眼井的建设成本约 1000 元、每月的使用成本 10 多元，就一般农村居民而言均能承受。

庭院分散式和小型集中式供水工程为小井径浅井、小直径螺杆潜水泵取水结构，井径

150 - 110mm，井深 15 - 25m。采用 30 型回转钻机钻孔成井，钻穿上部松散层深入基岩 2 - 3m 后用保护套管作永久止水。成孔后主要含水层下圆孔过滤器，井底下 5m 同径沉砂管，螺杆潜水泵（0.3-1m³/h）放置深度一般 15 - 20m。

（四）开展了西部不同水文地质区地下水勘查技术方法集成化研究，已经并将为有效推动严重缺水地区人畜饮水用水的难题的解决提供技术支撑

本次工作针对我国西北内陆干旱盆地、青东和甘肃中东部碎屑岩盆地、陕北宁南黄土覆盖区、鄂尔多斯周边岩溶区、内蒙古北部高原区、辽西山区、红层盆地 7 个不同水文地质区开展了遥感、物探、钻探等综合方法勘查地下水集成化研究，已经并将为有效推动严重缺水地区人畜饮水用水的难题的解决提供技术支撑。

7 个不同水文地质区勘查技术方集成化研究成果见表 20-表 26。

下面给出各种方法集成化研究成果应用效果。

1、宁夏南部山区

宁夏南部是一片严重缺水的黄土丘陵地区，水文地质条件十分复杂，地下水资源勘查程度低。为解决当地人畜饮水之急，应用水文地质遥感调查、物探和钻探综合方法技术体系，在固原县东部甘城、高台、马渠、炭山、寨科、官厅、程儿山和河川八个乡（简称“东八乡”）黄土高原干旱的严重缺水地区，进行地下水勘查综合技术方法体系应用研究。

本项工作主要分四个层次：首先进行“东八乡”地区的 1：10 万水文遥感调查，分析评价区域水资源环境状况；其次，在严重缺水重点勘查区进行以遥感找水信息提取为主导的 1：2.5 万的遥感专题研究，优选遥感找水靶区；第三，在遥感找水靶区部位，实施物探新方法探测；第四，选择适宜的钻探技术开采地下水。

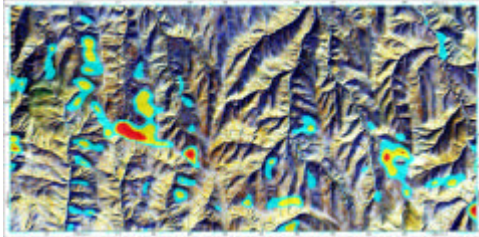


图 47 炭山乡遥感找水信息异常图

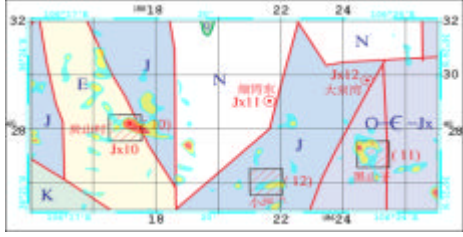


图 48 炭山乡遥感找水靶区预测图

水文遥感地质调查应用美国 Landsat—5TM、Landsat—7ETM 和加拿大 Radar—SAR 的遥感数据，通过遥感图像专题处理，结合已有资料对地表水和浅层地下水进行调查，在“东八乡”圈定出 17 个遥感找水靶区。图 47 和图 48 分别是炭山乡重点勘查区遥感找水信息异常图和遥感找水靶区预测图。

在找水靶区开展了直流电测深法（VES）—瞬变电磁测深法（TEM）—音频大地电磁法（AMT（MT））及三种方法联合反演方法，勘查结果见图 49 - 52。

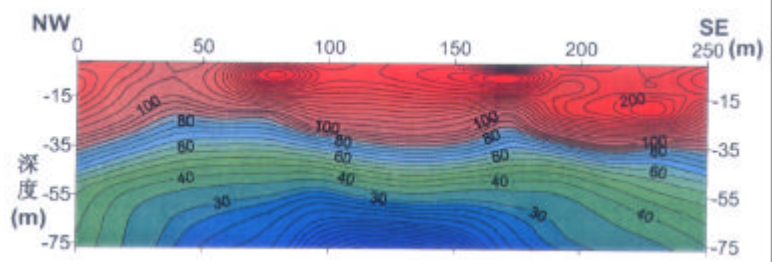


图 49 炭山乡重点勘查区直流电测深法（VES）勘查剖面图

根据勘查结果，推断地层岩性、构造分布（图 53）。据此确定宜井孔位 Jx10（图 52），并选择泡沫钻探新技术实施探采结合井（Jx10）进行验证。Jx10 探采结合井终孔深度 250m，在深度 200m 处打到侏罗系含水层中的可饮用水，经抽水试验，涌水量 250m³/d，矿化度 1.1g/L。从而改变了过去认为本区侏罗系无淡水的观念，“为严重缺水地区找到了一条找水新路，使西部严重缺水地区地下水勘查工作有了新的前景”。

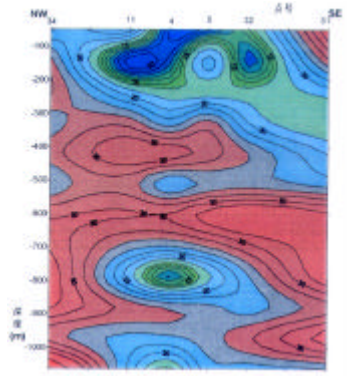
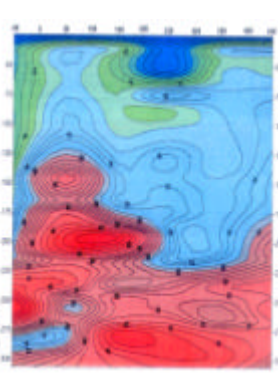


图 50 炭山乡重点勘查区瞬变电磁法（TEM）勘查剖面图



51 炭山乡重点勘查区音频大地电磁测深法（AMT）勘查

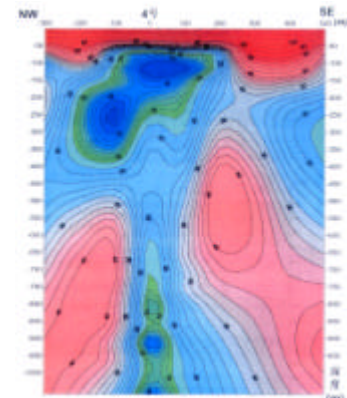


图 52 炭山乡重点区 VES - TEM - AMT 联合反演剖面图

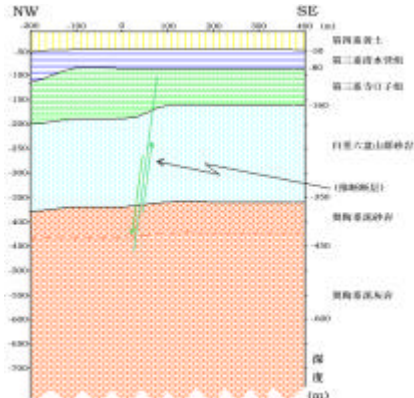


图 53 炭山乡 Jx10 探水井部位 联合物探探 测推断地质断面图

2、辽宁西部凌源市地下水勘查

在凌源市地下水勘查中开展了 1:5 万水文地质、遥感地质调查以及综合物探勘查。查清了凌源市不同类型地下水遥感找水信息异常分布位置，确定了遥感找水靶区。在此基础上，进行了综合物探工作，确定具体孔位，实施打井取水工程。

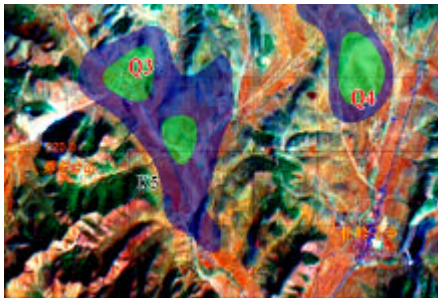


图 54 松岭子乡遥感找水信息异常

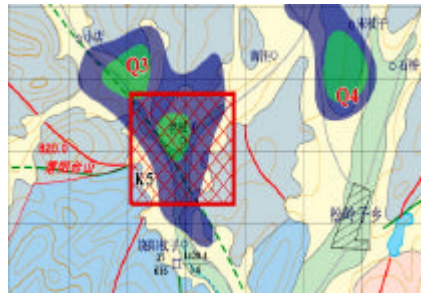


图 55 松岭子乡遥感找水靶区

本次遥感地质调查选用 ETM 遥感图像解译, 确定找水靶区。以遥感水信息异常为基本标志, 尤其是一级异常, 当它们出现在诸如构造断块界面, 断裂与断裂交接或突变地段且地表或浅地表湿度较大, 侵蚀-剥蚀程度适中的地貌单元类型突变地段, 又具有良好的含水层存在时, 即可圈定为遥感找水靶区。图 54 - 图 56 为松岭子乡遥感找水信息异常图和找水靶区图。

在遥感确定找水靶区的基础上, 选用了音频大地电场法、甚低频电磁法、音频大地电磁测深法 (EH-4 电导率成像系统) 等综合物探技术进行勘查。勘查结果见图 56。综合分析各种方法资料推断断层倾向北西, 倾角较陡, 大于 80° , 其中在深度 60m 及 120m 左右为岩溶裂隙发育富水段, 为此在剖面 40m 处布设钻孔位置。钻探结果: 孔深 114m, 45—88m 段岩石破碎富水, 水量 190t/d, 与综合方法勘查结果一致。

四、研究成果对推动水文地质科学进步的作用

1、本次探索出的不同类型水文地质条件区的遥感、地球物理找水技术方法体系, 不同地层条件下地下水开采新技术以及多种方法的集成化研究成果等实践方面的创新, 把我国干旱缺水地区地下水勘查与地下水开采工程的实践提升到了一个新的台阶。

2、研究成果丰富和发展了地下水勘查理论与实践, 推动了行业科技进步。中国地质大学、长安大学、吉林大学等院校将其指定为水文水资源学科本科生、研究生的参考教材。

五、产生的社会和经济效益

1、本次研究成果属于西部严重缺水地区人畜饮用地下水勘查示范工程的一部分, 已在实践中得到广泛应用, 先后建立的 340 眼深井及 6 万余眼浅井, 直接为 300 万居民、200 余万牲畜提供饮用水。饮用水问题解决后, 使得当地农民从取水劳动力可以解放可以外出务工、养殖种植业得到发展、医药费减少等方面都可获得直接新增经济收乳, 根据各省、县有关部门提供的经济效益评估资料, 1999-2004 年, 这些示范工程给当地农民所带来的直接新增经济收入累计达到 7.4 亿元。且以后每年还将会为当地居民产生直接经济收入近 3 亿元。

2、推动了西部居民饮用缺水这一国家层面重大问题解决。到 2008 年, 至少使西部 1000 万人饮水困难得到解决。

3、农民得到巨大实惠, 党群干群关系更加密切。自来水、洗衣机、热水器等进入农户, 农民生活质量改善, 拉动了当地经济发展。群众誉之为“德政工程”、“民心工程”。

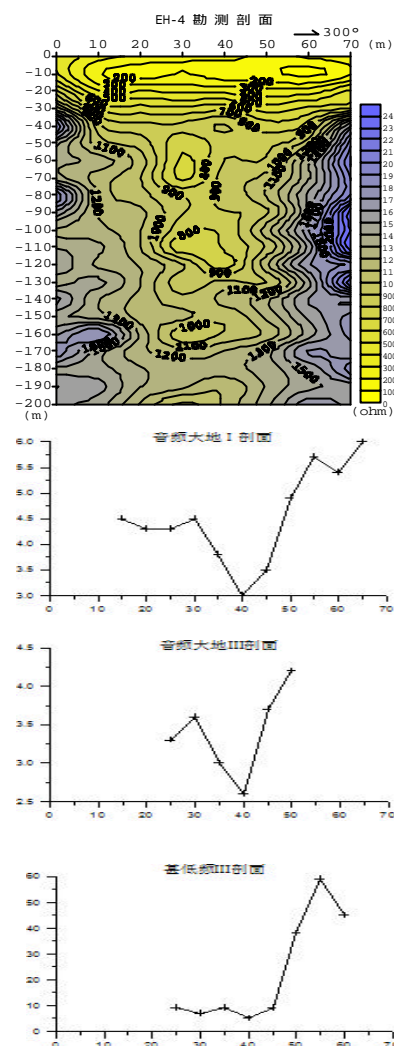


图 56 凌源市基岩裂隙水
综合物探勘查结果

表 20 内陆盆地地下水勘查技术方法体系

分区	地下水类型	遥 感			物 探			钻 探		
		解决问题	数据源	解译标志	解决问题	方法组合	工作步骤	解决问题	钻进技术	成井工艺
山前深埋带	松散岩类孔隙水	划分深埋径流区	利用可见光、红外影像解译	建立山前断裂带、地貌、植被解译标志	构造空间分布特征、规模、产状及其对地下水的控制机制，地层岩性结构，地下水水位埋深、含水层埋深与厚度等	接地条件好，采用频率域电磁测深；接地条件差，采用瞬变电磁法。条件允许的话，采用浅层高分辨率地震会取得更好的效果	频率域电磁测深法或瞬变电磁法用于寻找地下水水位浅埋区和颗粒相对较小地段，浅层地震配合电磁法判断构造性质及控水作用，确定井位。	解决施工供水困难、漂卵石地层钻进困难和冲洗循环介质漏失等问题	气举反循环钻进、潜孔锤与气举反循环组合钻进、充气泡沫泥浆钻进方法	
平原多层结构区	山前冲洪积扇区孔隙水	解译扇内浅层潜水	利用多光谱影像、全色及彩红外影像解译	建立冲洪积扇体的解译标志	评价地下水矿化度分布特征，查明含水层埋深与厚度，判断其富水性，确定宜井孔位	地下水埋深小于 100 米，采用频率域电磁测深、激发极化法、核磁共振法组合；地下水埋深大于 100 米，采用频率域电磁测深法与交流激发极化法组合	采用频率域电磁测深法普查，圈定含水层分布范围，评价地下水矿化度分布特征；然后采用激发极化法（或交流激发极化法、核磁共振法）判断含水层富水性，确定富水地段。	解决井管腐蚀问题	常规回旋钻进，气举反循环钻进	采用全塑成井工艺
	扇前平原区孔隙水	结合浅层地下水热红外、微波异常，解译相对富水靶区	用可见光、红外或微波图像解译	建立细土平原区植被、地下水遥感异常解译标志	同上	频率域测深、激发极化与核磁共振法组合	同上	同上	同上	同上
	冲洪积扇前缘与平原区交接地段孔隙水	分析泉水的成因，解译邻近的湿地貌区	用可见光、红外、热红外影像解译	建立交接地段潜水、沼泽溢出的解译标志	同上	同上	同上	解决井管腐蚀问题	同上	采用分层填砾、分层止水成井工艺，隔离不良水质含水层。采用全塑成井工艺
	盆地腹地沙漠区孔隙水	解译植被特征，寻找湿地	多光谱与微波遥感影像对比解译	建立低洼水系、古河道等解译标志	评价地下水矿化度，查明含水层埋深与厚度，判断其富水性，确定宜井孔位	埋深小于 100 米，接地条件一般，采用频率测深与激发极化法、核磁共振法组合；接地条件差，采用瞬变电磁测深与核磁共振法组合。若地下水埋藏大于 100 米，接地条件一般，采用频率测深与交流激发极化法组合；接地条件差，采用瞬变电磁测深与交流激发极化法组合	采用频率域电磁测深法或瞬变电磁法普查，圈定含水层分布范围，评价地下水矿化度；然后采用激发极化法（或交流激发极化法、核磁共振法）判断含水层富水性，确定富水地段。	提高钻进效率	采用气举反循环钻进	采用分层填砾、分层止水成井工艺隔离不良水质含水层

表 21 青东和甘肃中部碎屑岩盆地勘查方法技术体系

地下水 类 型	遥 感			物 探			钻 探		
	解决问题	数据源	解译标志	解决问题	方法组合	工作步骤	解决问题	钻进技术	成井工艺
孔隙水	圈定相对富水区	可见光、红外、热红外影像解译	建立地貌解译标志，提取地表遥感水信息异常	查明含水层分布范围，埋深及厚度，确定富水地段	采用直流电阻率测深、激发极化法、核磁共振法组合	直流电测深法用于圈定含水层空间分布范围，激发极化法、核磁共振法用于判断含水层富水性，确定富水地段。	解决施工供水和冲洗介质漏失问题。提高钻进效率	采用气举反循环钻进、充气泡沫泥浆钻进	采用分层填砾、分层止水成井工艺隔离不良水质含水层
碎屑岩孔隙裂隙水	解译构造发育特征	多光谱影像与微波雷达影像解译	建立断层、构造解译标志，采用遥感多层次分析法	地层、岩性结构，砂岩、砂砾岩裂隙发育特征，地下水水质变化特征等	频率域电磁测深与地震组合	电磁测深法用于解决地下水水质变化特征，初步了解地层结构及裂隙发育特征。地震主要用于精细描述地层结构和裂隙发育特征。	提高钻进效率，解决施工供水困难	采用多工艺空气钻进技术	

表 22 宁南陕北黄土高原区地下水勘查方法技术体系

地下水类型	遥 感			物 探			钻 探		
	解决问题	数据源	解译标志	解决问题	方法组合	工作步骤	解决问题	钻进技术	成井工艺
低洼的微地貌黄土裂隙水	结合水信息遥感异常，解译黄土塬、峁。	用高分辨率可见光、红外、热红外影像解译。	建立地貌、断裂解译标志；	查明含水层空间分布范围，确定富水地段。	直流电测深法、核磁共振法、激发极化法组合。	直流电测深法用于圈定含水层空间分布范围，激发极化法、核磁共振法确定含水层富水性，确定富水地段。	提高单价出水量	采用回转钻进或者开挖大口井。	
河谷松散孔隙水	结合松散层浅层水遥感异常特征预测靶区	多光谱影像与微波图像解译。	建立水系、隐伏构造解译标志。。	同上	直流电测深法、核磁共振法、激发极化法组合。。	同上	增大单井出水量。	渗流井取水工程	

表 23 鄂尔多斯盆地周边岩溶区地下水勘查方法技术体系

地下水 类 型	遥 感			物 探			钻 探		
	解决问题	数据源	解译标志	解决问题	方法组合	工作步骤	解决问题	钻进技术	成井工艺
深埋岩溶区	解译构造性质及沿断裂带发育的河谷深岩溶的分布特征	多光谱影像结合航磁数据解译	建立地层、构造和岩溶地貌解译标志	灰岩界面埋深，隐伏构造空间分布特征	声频大地电场法、放射性法、频率域电磁测深瞬变电磁法、与地震组合	声频大地电场法、放射性法用于普查初步圈定灰岩界面埋深和隐伏构造的大致范围，频率域电磁测深法、瞬变电磁法与地震在圈定的范围内准确确定地层结构、隐伏构造产状、性质，确定宜井孔位。	解决基岩地层钻进效率低、地层破碎坍塌、冲洗介质漏失、施工供水困难及水井出水率低等问题	采用泡沫增压泵钻进、潜孔锤钻进、空气泡沫潜孔锤钻进、空气潜孔锤反循环钻进、潜孔锤钻进与气举反循环钻进组合	采用膨胀橡胶止水带或者水泥浆封闭隔离上部不良水质水。采用爆破压裂技术或酸洗井技术增加单井出水量
浅埋岩溶区	解译溶蚀地貌发育区的溶斗、落水洞	高分辨率可见光、红外、热红外影像空间叠加解译	建立地下河、溶潭、落水洞等断裂构造解译标志	查明构造的规模、产状、性质及多个构造间的水力联系，判断含水体的富水性	声频大地电场法、放射性法、电剖面法、直流电测深法、激发极化法等	声频大地电场法、放射性法、电剖面法用于了解构造的分布规律、规模、产状、性质，直流电测深法、激发极化法用于确定地层结构，判断含水体的富水性，确定孔位。	解决基岩地层钻进效率低、地层破碎坍塌、冲洗介质漏失和施工供水困难等问题	采用空气潜孔锤钻进、空气泡沫潜孔锤钻进、潜孔锤反循环钻进、空气泡沫增压钻进	采用爆破压裂技术或酸洗井技术，增大水井出水量

表 24 内蒙古北部高原区地下水勘查方法技术体系

地下水类型	遥 感			物 探			钻 探		
	解决问题	数据源	解译标志	解决问题	方法组合	工作步骤	解决问题	钻进技术	成井工艺
山间盆地河谷川地松散孔隙水	结合浅层潜水的红外冷异常和微波异常预测富水地段	可见光、红外图像对比微波影像解译	建立地貌分区解译标志；浅层地下水信息异常标志	查明含水层空间分布范围，确定富水地段	直流电测深法、瞬变电磁测深法、激发极化法，含水层埋深小于 100 米时可选用核磁共振法	直流电测深法、瞬变电磁测深法用于查明含水层空间分布。激发极化法、核磁共振法用于判断富水性，确定富水地段。	解决井管腐蚀问题	常规回转泥浆钻进、气举反循环钻进	采用全塑成井工艺
构造裂隙水	寻找断层，分析断裂性质，判断其富水性	多光谱与微波遥感图像解译	建立断裂带的解译标志	查明构造的规模、产状、性质及多个构造间的水力联系，判断含水体的富水性	声频大地电场法、放射性法、电剖面法、直流电测深法、激发极化法等	声频大地电场法、放射性法、电剖面法用于了解构造的分布规律、规模、产状、性质，直流电测深法、激发极化法用于确定地层结构，判断含水体的富水性，确定孔位。	解决基岩地层钻进效率低、施工供水困难问题	采用空气潜孔锤钻进、空气泡沫潜孔锤钻进、潜孔锤反循环钻进	
盆地边缘和河谷川地地下水溢出带、泉水	分析地下水溢出带、泉的形成和分布规律	多光谱波段组合、热红外图像解译	建立泉、构造解译标志	含水体富水性及空间分布位置	直流电阻率法、激发极化法、核磁共振法组合	直流电阻率法用于查明含水体空间分布位置，激发极化法、核磁共振法判断含水体的富水性。		引泉引流取水工程	

表 25 辽宁西部山区地下水勘查方法技术体系

地下水 类 型	遥 感			物 探			钻 探	
	解决问题	数据源	解译标志	解决问题	方法组合	工作步骤	解决问题	钻进技术
碎屑岩裂隙水	解译褶皱构造，圈定轴部及翼部转折端富水区	多光谱影像与微波影像组合解译	建立褶皱构造、水系、地貌解译标志	地层岩性结构、裂隙发育特征及其富水性	激电测深法、频率域电磁测深法组合	频率域电磁测深法了解地层结构及裂隙发育特征，激电测深法判断裂隙带富水性。		常规回转钻进
碳酸盐类岩 溶水	解译岩性、地貌、构造发育特征	多光谱图像与微波图像对比解译	建立构造、水系、水文地质点解译标志	碳酸盐岩溶裂隙发育程度，地层结构、构造裂隙空间分布特征	断层破碎带岩溶裂隙水采用音频大地电场法(或甚低频综合电磁法)和音频大地电磁测深法组合；褶皱带岩溶裂隙水采用联合剖面法和瞬变电磁测深法组合	音频大地电场法（或甚低频法）联合剖面法了解岩溶构造的水平位置；电磁测深法精确定构造空间分布特征，岩溶发育程度，确定孔位。	解决基岩地层钻进效率地层破碎坍塌、冲洗介质漏失严重和施工供水困难等问题	采用空气潜孔锤钻进、空气泡沫潜孔锤钻进
基岩裂隙水	解译构造裂隙，圈定断裂发育地带	可见光、红外、热红外图像	建立构造裂隙、植被的解译标志，提取遥感水信息异常	查明构造的规模、产状、性质及多个构造间的水力联系，判断含水体的富水性	音频大地电场法、放射性法、电剖面法、直流电测深法等	音频大地电场法、放射性法、电剖面法用于了解构造的分布规律、规模、产状、性质，直流电测深法、激发极化法用于确定地层结构，判断含水体的富水性，确定孔位。	解决基岩地层钻进效率低，地层破碎坍塌、冲洗介质漏失、施工供水困难和钻进液堵塞裂隙等问题	采用空气潜孔锤钻进、空气泡沫潜孔锤钻进

表 26 红层盆地地下水勘查方法技术体系

地下水类型	遥 感			物 探			钻 探	
	解决问题	数据源	解译标志	解决问题	方法组合	工作步骤	解决问题	钻进技术
浅层风化裂隙水	解译微地貌,结合浅层地下水热红外异常预测靶区	利用高分辨率可见光、红外、热红外图像解译	建立宽缓沟谷、宽缓坪、洼地上农田和植被的解译标志	确定风化壳底界埋深以及风化壳的富水性；了解咸淡水界面	高密度电阻率法、探地雷达、激发极化法、核磁共振法	高密度电法、探地雷达法用于查明风化壳埋深、厚度及其裂隙发育程度，了解咸淡水界面。激发极化法、核磁共振法用于判断富水性	解决因施工区道路不畅，钻孔分散、搬迁频繁而引起的施工效率低、钻探成本高等问题	微型钻机钻进技术
构造裂隙水	解译构造裂隙；结合地貌特征、岩层的含水性圈定构造发育地带	使用多光谱图像进行波段组合，结合使用微波图像解译	建立红层中褶皱构造解译标志	确定构造带空间分布分布特征；了解咸淡水界面	频率域电磁测深法、瞬变电磁法激发极化法	频率域电磁法或瞬变电磁法用于查明构造分布特征，了解咸淡水界面，激发极化法判断富水性	解决施工供水困难问题	常规回转钻进、有条件的地方可采用空气钻进