

# 长三角地区中深层地热资源勘查技术创新与应用

邹鹏飞<sup>1,2</sup>, 徐雪球<sup>1\*</sup>, 程远志<sup>3</sup>, 杜建国<sup>1</sup>, 王宽彪<sup>1</sup>, 谢建磊<sup>4</sup>, 毛官辉<sup>5</sup>, 官煜<sup>6</sup>

- 江苏省地质调查研究院, 南京 210018
- 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023
- 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
- 上海市地质调查研究院, 上海 200072
- 浙江省水文地质工程地质大队, 宁波 315012
- 安徽省地质环境监测总站, 合肥 230001

**摘要** 总结了长三角地区中深层地热资源勘查技术方法, 评估了其适用条件及应用效果, 形成长三角地区地热资源勘查评价方法体系。结果表明: 重力和磁法勘探适用于探测沉积盆地基底、断裂构造、岩浆岩分布等信息; 可控源音频大地电磁法(CSAMT)和广域电磁法(WFEM)能有效探测隐伏基岩岩性和富水断裂位置, 精度高, 是确定地热井位最有效的技术方法; 微动勘查方法(MSM)对深部低速层的分辨能力优于其他物探方法; 地温测量和氦气测量是浅覆盖区勘查对流型地热资源最有效的手段; 构造隆起区勘查深埋传导型地热资源宜采用CSAMT、WFEM、MSM、重力、磁法组合; 而勘查浅层对流型地热资源, 宜采用CSAMT、测温、测氦组合; 在沉积盆地区勘查传导型孔隙地热资源, 采用CSAMT、大极距电测深、微动组合; 在隆起与凹陷断阶带, 勘查复合型地热资源, 采用CSAMT、MSM、高精度重力、浅孔测温组合。在水热活动比较强烈的地区, 通过分析土壤和地下水中某些特殊元素的富集规律, 判断地下热储构造、圈定地热异常范围; 利用地热流体中阳离子地热温标和SiO<sub>2</sub>温标等估算热储温度, 氢氧稳定同位素推测地热流体补给高程, 进而研究地热系统成因。孔隙型地热井, 一般采用正循环泥浆钻井, 洗井采用喷射洗井、多磷酸盐洗井等方法, 全孔下入套管, 取水层段采用缠丝滤水管成井; 裂隙型地热井, 一般采用正循环泥浆钻井, 适用喷射洗井、多磷酸盐洗

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2023-02-28

基金项目: 中国地质调查局全国地热资源现状调查评价与区划项目(12120113077300); 江苏省省级地质勘查项目(2021-2-22); 中国科学院学部咨询评议项目(2020-DX03-B-007)

作者简介: 邹鹏飞, 高级工程师, 研究方向为地热资源调查评价与开发利用, 电子信箱: 420618238@qq.com; 徐雪球(通信作者), 研究员级高级工程师, 研究方向为基础地质、地热资源勘查, 电子信箱: xueqiuxu888@163.com

引用格式: 邹鹏飞, 徐雪球, 程远志, 等. 长三角地区中深层地热资源勘查技术创新与应用[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 46-65; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.006

井、液态二氧化碳洗井、压缩空气洗井等多种洗井方法,取水层段采用裸眼成井或滤水管成井;岩溶型地热井,可采用气举反循环与正循环钻进工艺,取水层段采用裸眼成井或滤水管成井;酸化压裂洗井是提高岩溶-裂隙型地热井出水量最有效的方法。

**关键词** 长三角;中深层地热资源;地球物理;地球化学;地热钻井

长江三角洲地区(简称“长三角”,指上海、江苏、浙江、安徽“三省一市”)作为中国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一,在服务国家高质量发展大局中具有举足轻重的战略地位。2018年11月,习近平总书记在首届中国国际进口博览会上宣布,支持长江三角洲区域一体化发展,并上升为国家战略,明确提出构建现代化经济体系。2019年12月,《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》发布,提出到2035年基本建成现代化经济体系的发展目标,为长三角一体化发展的全面实施绘就了蓝图。现代化经济体系需要有现代化能源系统的支撑。近年来,长三角地区在能源领域不断取得进展,但区域内仍面临着“保供、提质、增效、优化、清洁”等问题。因此,推进长三角地区构建清洁低碳安全高效的能源体系,对支撑现代化经济体系建设具有现实的必要性和紧迫性。

地热能是一种储量丰富、分布较广、稳定可靠的非碳基清洁能源,在可再生能源领域具有举足轻重的地位。地热能可细分为浅层地热、水热型地热和干热岩3种类型<sup>[1]</sup>。地热能利用形式包括以供暖(制冷)、工业干燥、康养理疗为主的直接利用和地热发电<sup>[2]</sup>。截至2020年底,中国地热能供暖制冷面积累计达到13.9亿m<sup>2</sup>,位居世界第一。近年来,受全球气候变化的影响,中国北部冷空气不断南下,雨雪分界线南移,长三角冬季供暖需求显著增加;夏季高温事件强度呈显著正趋势的区域继续增加,增加最多的是经济较发达的长江沿岸、长江三角洲以及东南沿海地区,夏季长度有极显著的增加趋势<sup>[3-4]</sup>。夏季制冷、冬季供暖的需求很大。根据长三角地热资源情况和供暖(制冷)需求,地热能的规模化开发利用可以助力长三角地区的低碳发展和

“双碳”目标的实现。

针对长三角地区“一体化”和“高质量”发展理念,中国科学院设立“长三角地区地热资源及其综合利用研究”项目,联合三省一市共同开展相关研究,以便系统提出长三角地区地热资源综合开发利用对策,为长三角一体化发展提供支撑。本文为该项目成果之一,对长三角地区中深层地热资源勘查技术方法、适用条件及应用效果进行了系统研究,基本形成长三角地区地热资源勘查评价技术方法体系。

## 1 地热地质特征

长三角地区位于中国东部沿海,地跨华北和华南2大板块,区域上自北向南分为华北陆块、北秦岭造山带、扬子陆块、华南造山带4个二级构造单元(图1)。不同构造单元的地质发展历史、沉积作用和岩浆活动等存在较大差异,发育的地层有别。在漫长的地质演化历史中,形成了一系列断裂、褶皱和隆拗构造,为中深层地热资源的形成创造了良好的条件。长三角地区水热型地热资源受地质构造控制明显<sup>[5-8]</sup>。按成因,长三角地区地热资源主要分为隆起山地对流型与沉积盆地隐伏传导型两大地热系统。对流型地热资源多以天然出露的温泉或以浅埋形式存在,多呈带状或点状分布于构造隆起区,都与断裂构造相关。隐伏传导型地热资源广泛分布于中、新生代盆地和构造隆起区。按照地热流体储存特征可分为岩溶型、裂隙型和孔隙型3大类型。根据空间分布可分为带状、层状2种基本类型。

江苏按照地质构造和地层特征,自北向南可划

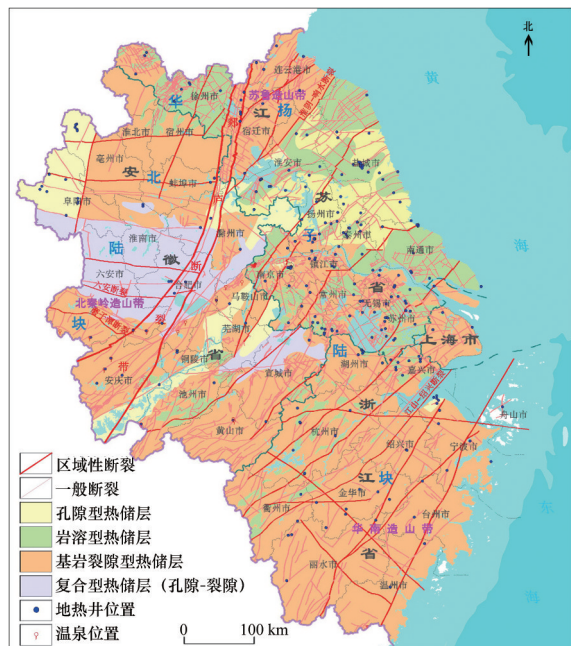


图1 长三角地区地热地质图

分为徐州、宿迁—连云港、苏中、苏南4大地热资源区50多个远景区。其中南京汤山和汤泉温泉、连云港东海温泉镇(原汤庙)温泉是典型的对流型地热资源,镇江韦岗温泉、淮安老子山温泉、宝应黄荡地热田及如东小洋口地热田为隐伏对流型地热资源。全省大地热流平均值 $63.7 \text{ mW/m}^2$ ,苏北盆地平均值为 $64.9 \text{ mW/m}^2$ ,为省内最高。苏北盆地地温梯度平均值约为 $3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。华北地块区一般小于 $2.5^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。苏鲁造山带 $2\sim 2.5^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。苏南隆起区一般小于 $2.5^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。全省地热储层主要有碳酸盐岩岩溶-裂隙型(元古代、古生代、中生代)、基岩裂隙型(元古代变质岩、古生代碎屑岩、中生代岩浆岩)以及松散岩类孔隙-裂隙型(新近纪松散层、古近纪半固结)3类。其中,孔隙型热储层主要分布在苏北盆地,岩溶型及裂隙型在全省各地均有分布。控热构造以北东向及北西向断裂为主。前者形成时代较早,切割深、延伸远,多为控盆边界大断裂;而北西向断裂形成时间相对较晚,大多具有张性(扭张性或张扭性)特征,为富水断裂。与北东向断裂的交汇带是地热流体富集有利区段。

上海按照地质背景及地热地质条件,分有中部北东向、中部北西向、金桥—崇明、佘山—重固4个

地热资源区12个远景区,每个地热资源区带具有独特的地热地质条件。下古生界平均地温梯度 $2.1\sim 3.4^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ;上侏罗统 $1.8\sim 2.36^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ;大地热流值约 $45\sim 65 \text{ mW/m}^2$ ,与苏南和浙西北地区相当。上海地区地热储层分为带状和层状2大类。层状热储主要有2种:一为具有气孔构造的新生代玄武岩类及其顶部风化带,二为震旦系、寒武系和中下奥陶统碳酸盐岩,上部存在古暴露面时,古岩溶构造发育,具有良好的富水性。带状热储主要指断裂破碎带。NE、NNE、NW-NNW和近EW向4组断裂发育,相互切割,具有形成带状热储的构造条件,其中以北东向断裂与东西、北东向断裂的交切部位最为有利。安徽地热资源的形成与沉积盆地、隆起山地等地质构造关系密切。上海主要以低温地热资源为主,最高井口水温目前达 $52.5^\circ\text{C}$ 。

浙江以江山—绍兴深断裂为界,分为浙西北和浙东南2个地质单元。依据赋存环境和热传导方式,将浙江省地热资源分为沉积盆地型和隆起山地型2类。根据储层岩石类型和控矿构造特征,将浙江省地热类型分为层状、带状和带状兼层状3个大类,又进一步细分为新生代沉积盆地碎屑岩类孔隙亚型、白垩纪沉积盆地盖层碎屑岩夹玄武岩孔隙裂隙亚型、白垩纪沉积盆地火山岩(花岗岩)类构造裂隙亚型、白垩纪沉积盆地其他岩类构造裂隙亚型、构造隆起区火山岩(花岗岩)类构造裂隙亚型、构造隆起区其他岩类构造裂隙亚型、火山岩(花岗岩)类火山构造裂隙亚型、白垩纪沉积盆地基底碳酸盐岩岩溶裂隙亚型和构造隆起区碳酸盐岩岩溶裂隙亚型9大亚类<sup>[8]</sup>。浙江省内断裂构造发育,地热资源呈带状分布的特征明显,以北东向和北西向断裂为最主要的控矿构造,断裂交汇部位往往是水热型地热赋存有利位置。热储层岩性、断裂活动性、萤石矿化和地震活动是影响地热资源分布和规模的主要因素。浙江省大地热流值在 $61.67\sim 87.92 \text{ mW/m}^2$ ,平均 $73.74 \text{ mW/m}^2$ ,高值区集中在浙东慈溪—宁波—象山及浙中、西部义乌—金华—江山一线,大于 $80 \text{ mW/m}^2$ ,地温梯度高值区主要分布在浙西常山—江山—龙泉一带,大于 $2.9^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。浙江省已发现水热型地热资源点49处。

安徽省按构造成因将地热资源分为隆起山地对流型和沉积盆地传导型2大类型,其中,隆起山地对流型又可细分为板内深循环型,沉积盆地传导型又可细分为断陷盆地型、拗陷盆地型。大地热流60~160 mW/m<sup>2</sup>不等,由皖西北往大别山区和沿江地区逐渐升高,表现出西北低中部高的特点。大别山区热流值大于100 mW/m<sup>2</sup>,金寨县—霍山县—舒城县—庐江县汤池一线100.4~151.5 mW/m<sup>2</sup>,岳西县—太湖县一线118.2~131.3 mW/m<sup>2</sup>。皖南山区的黄山以北—旌德县一线大地热流值在130~156.4 mW/m<sup>2</sup>。隆起山地型地热资源主要分布于大别山区(大别山断块隆起带)、巢湖一和县一带(巢湖穹断褶带)及皖南山区(江南台隆深大断裂带),地热显示以温泉为主;传导型地热资源主要分布在皖西北地区、皖北地区、淮南陷褶断带、皖中盆地区及沿江地区。全省分为隆起山地对流型地热资源勘查及开发利用潜力区和沉积盆地传导型地热资源勘查及开发利用潜力区。热储类型主要有层状、带状、层状兼带状3种类型。对流型热储为带状,传导型热储为层状及层状兼带状<sup>[6]</sup>。前者分为馆陶组热储、奥陶系灰岩热储、寒武系灰岩热储和白垩系砂岩热储。地表现有温泉14处,钻孔等地热异常点24个。

## 2 地热勘查技术应用

据《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》,地热资源勘查分为调查、预可行性勘查、可行性勘查和开采4个阶段。不同勘查阶段,因工作任务不同,需要采用不同的技术方法。常用的主要有地热地质、地球物理、地球化学、钻探与试验、取样测试、动态监测等工作。长三角地区地质构造复杂,地热资源分布广泛,除了少量地热显示为温泉出露外,大部分皆隐伏在一定深度的地热储层中。因此,深部地球物理勘探是长三角地区地热勘查中采用的主要方法。目前应用的主要有重力、磁法、直流电测深、可控源音频大地电磁法、广域电磁法、微动测深、人工地震勘探等,由于该类物探手段分别具有特定的应用范围,因此,选择各种物探方法

的有效组合即综合物探方法,可以有效地圈定地热靶区,节约勘探成本,排除单一物探方法的多解性,成功应用于长三角地区地热勘查实例<sup>[9-12]</sup>。这些方法从理论到实践均较为成熟,在地热勘查靶区圈定、钻井井位选址论证、地热资源评价等工作中发挥了重要作用。

### 2.1 地热地质调查

地热地质调查主要目的是了解勘查区地热地质背景,调查与地热资源有关的地层结构、地质构造、水文地质、地温场特征等,以便为地热勘探工作提供依据。地热流体的运移、富集与地质条件密切相关。因此,有地热流体分布的地方,在特定的地质条件下,往往容易形成地热异常,有的直接出露地表形成温泉。另一类埋藏于深部地层中的地热流体往往不产生地热异常,需要通过地层、断裂、褶皱等地质条件的详细调查,研究热储结构、储热构造的分布规律等。

长三角地区均开展过不同比例尺的区域地质、水文地质、矿产地质、石油地质、深部地球物理勘查等工作,地质研究程度很高,积累丰富的基础资料。该项工作的重点是充分收集和利用这些地质资料,以地热地质条件为切入点,分析研究地热资源形成的可能性,圈定勘查靶区,为地热资源勘查提供方向。在确定勘查靶区后,需要初步建立地热地质概念模型,为下一步工作方法的选择、工作部署等提供依据。

### 2.2 地球物理探测

#### 2.2.1 可控源音频大地电磁法

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种频率域电磁方法和成熟的电阻率勘探工具,它是在大地电磁法(MT)和音频大地电磁法(AMT)的基础上发展起来的一种人工源频率域测深方法<sup>[13-14]</sup>,具有探测深度大(2~3 km)、抗干扰能力强、分辨率高等优点<sup>[15]</sup>,广泛应用在地热资源、有色金属矿产、水文地质和工程地质勘查实践中<sup>[16-22]</sup>。该方法适用于一维或已知构造主轴的二维地区,是研究深部地质构造和寻找隐伏断层、地热流体的有效手段,其测量的电阻率参数对断裂带反应非常灵敏,在断层位置,从电阻率测深反演的断面图上可清楚地看出低

阻区,断层两边为相对高阻区,电阻率呈现出中间低、两边高的异常特征。在中深层地热资源勘查中主要用于探测隐伏的地层、岩浆岩、地质构造,分析储盖结构、富集地热流体的断裂破碎带、溶洞等分布特征。

上海崇明岛地热勘查,采用了CSAMT测深方法,结合区域重磁处理和解释、高精度重力剖面、高精度地面磁法剖面、微动测深和大地电磁测深等。确定的RCM1地热井(井深2415 m)反演电阻率断面如图2所示,1032~1072号点范围内出现高阻中

的低阻异常带,推断为含水的断裂破碎带引起。实际钻遇地层由浅到深为第四系-新近系(Q-N)、古近系-上白垩统(E-K<sub>2</sub>)、下白垩统(K<sub>1</sub>)、三叠系(T)、奥陶系(O),揭露地层结构与CSAMT推断结果除界面深度略有差异外,基本一致。测井资料显示井深1800~2000 m、2200~2300 m深度构造裂隙较为发育,为主要出水段,与F1断裂位置相对应;该地热井出水量约240 m<sup>3</sup>/d,水温52.5℃(上海地区温度最高),充分验证了CSAMT推断张性断裂的可靠性。

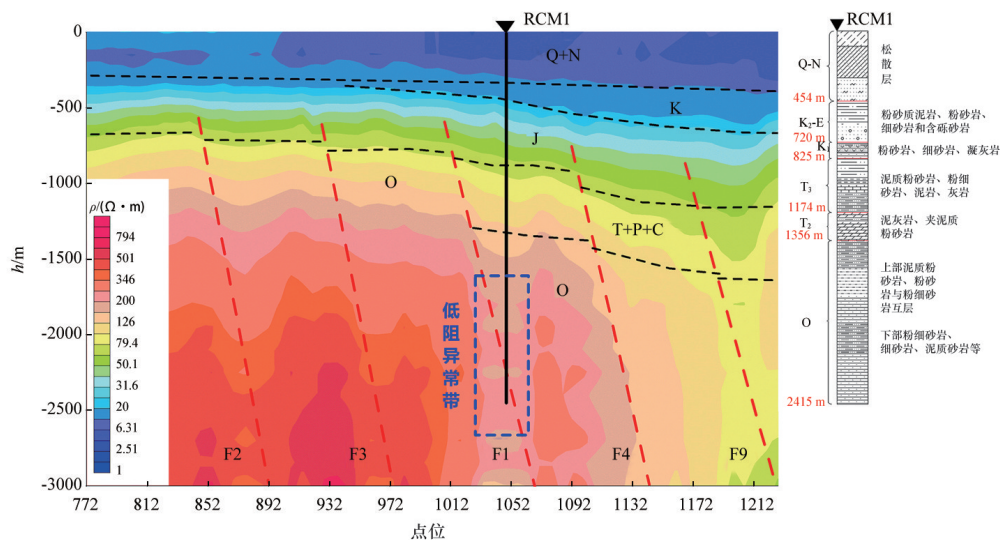


图2 湖苏断裂(上海段)地质构造调查CSAMT勘查剖面反演电阻率和推断解释断面图

江苏宝应七里村地热勘查,采用CSAMT测深方法对深部地热储层和断裂裂隙进行反演,得到的电阻率及推断解释断面图见图3,可以看出该断面上确定的RBQ1地热井地层解释与实际揭露的地层较为一致,地热储层为奥陶系-寒武系(O-C)灰岩、白云质灰岩。测井资料表明,在孔深2488~3003.1 m发育11段不同类型的裂缝层,岩溶裂隙发育,累计厚度125.4 m,与图3中F1断裂对应。已有研究表明,该地区为北东向深大断裂及北西向导水断裂构造交会带和隆起与拗陷的结合部,印支面之下碳酸盐岩岩溶裂隙发育,热储温度约为99~116℃。抽水试验结果显示,该地热井大降深(降深52.86 m)出水量达1505 m<sup>3</sup>/d,水温高达93℃,是迄今为止长三角地区温度最高的地热井<sup>[23-24]</sup>。

上述实例表明,碳酸盐岩、砂岩等脆性岩层在地质构造作用下易形成构造裂隙,为地下热水提供了良好的储热和蓄水空间,与其他地质体相比,出现明显的电阻率差异使得CSAMT方法可以很好应用于此类地热资源勘查。该方法抗电磁干扰能力较差,随着勘探深度加大,采集到电磁信息减弱,有效性明显降低,因此,在应用时,需要结合已知地质特征及其他相关资料进行综合推断解释,降低勘查风险。

### 2.2.2 广域电磁法

广域电磁法(WFEM)是一种人工源频率域电磁勘探新方法,实现了频率域电磁法由平面波到曲面波的理论跨越,其继承了CSAMT场源可控的优点,克服了大地电磁法(MT)场源随机性和信号较

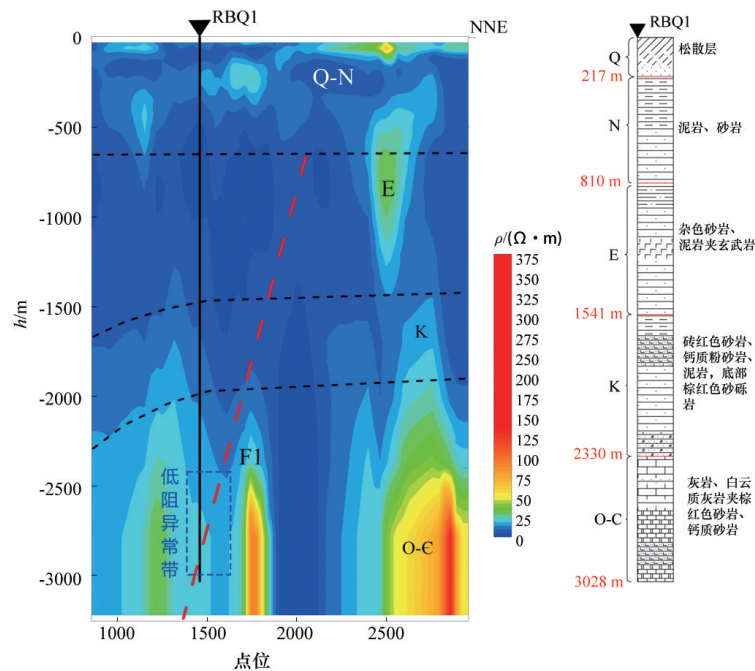


图3 江苏宝应七里村地区CSAMT勘查线反演电阻率及地质解释剖面

弱的缺点<sup>[25]</sup>,将CSAMT远场观测模式推进到中区探测模式<sup>[26]</sup>,从而摒弃了CSAMT远区信号微弱的劣势,扩展了观测适用范围<sup>[27]</sup>。该方法主要应用在地热勘探、固体矿产、页岩气勘探、压裂监测等方面<sup>[28]</sup>。长三角地区地热勘探大部分选择在电磁干扰严重的城市周边开展,要求探测技术达到相当的探测深度和精度,如中、高温地热资源( $>90^{\circ}\text{C}$ )的勘查,且要查明工区内储、盖、通等地热地质条件,这对区内电磁法勘探技术提出了更高的要求。

江苏仪征捺山地区地热资源勘查主要应用WFEM<sup>[29]</sup>进行。该地区采用最大供电电流110 A,最小发射电流75 A,工作频率最高为8192 Hz,频率最低为0.0117 Hz。EW走向的106测线反演电阻率及地质解释剖面显示(图4),100~118测点,0~50 m,低阻层,呈水平层状,属第四系一新近系;118~132测点,高阻层,为基性岩出露区;50~300 m,中阻层,解释为白垩纪浦口组,其中,东部电阻相对高区域解释为浦口组局部砾石聚集区引起的局部高阻;300~2200 m低阻带,推测为侏罗纪象山群细砂岩、粉砂岩与泥岩。从临近地区地热井资料,象山群砂岩裂隙发育,孔隙度高,且有一定的埋深,并

有F3和F4正断层发育,可作为上部储层;2200~2600 m为低阻到高阻过渡带,呈不规则分布,推测为奥陶系与侏罗系接触带,奥陶系长时间遭受风化剥蚀作用,顶部可能发育灰岩溶蚀带,具有较好的富水条件,为下部重点热储层。经捺山1井钻探验证,侏罗系象山群粉砂岩、细砂岩热储层,顶底埋深800~1500 m,出水量为621  $\text{m}^3/\text{d}$ ,水温 $46^{\circ}\text{C}$ ;下部地热储层为奥陶系灰岩,含水层深度2550 m,出水量872  $\text{m}^3/\text{d}$ ,出水温度 $66^{\circ}\text{C}$ 。WFEM法相比CSAMT,探测深度增大,电磁抗干扰能力、分辨率得到进一步提升,对深度较大的勘查区是一种非常有效的地球物理勘查方法。

### 2.2.3 重力勘探

重力勘探的原理是基于界面的起伏、岩性不均匀、地壳与壳下物质厚度变化等地质因素在内的叠加效应使大地重力正常场发生畸变,从而可利用重力并结合其他地质和物探工作来探测与地热资源有关的地质构造<sup>[30]</sup>。重力勘探分为区域性测量和重力剖面测量。区域性重力勘探常作为一种辅助方法用于对地热地质背景条件的探测。如判断调查区基底起伏、盆地构造和断裂构造的空间展布,

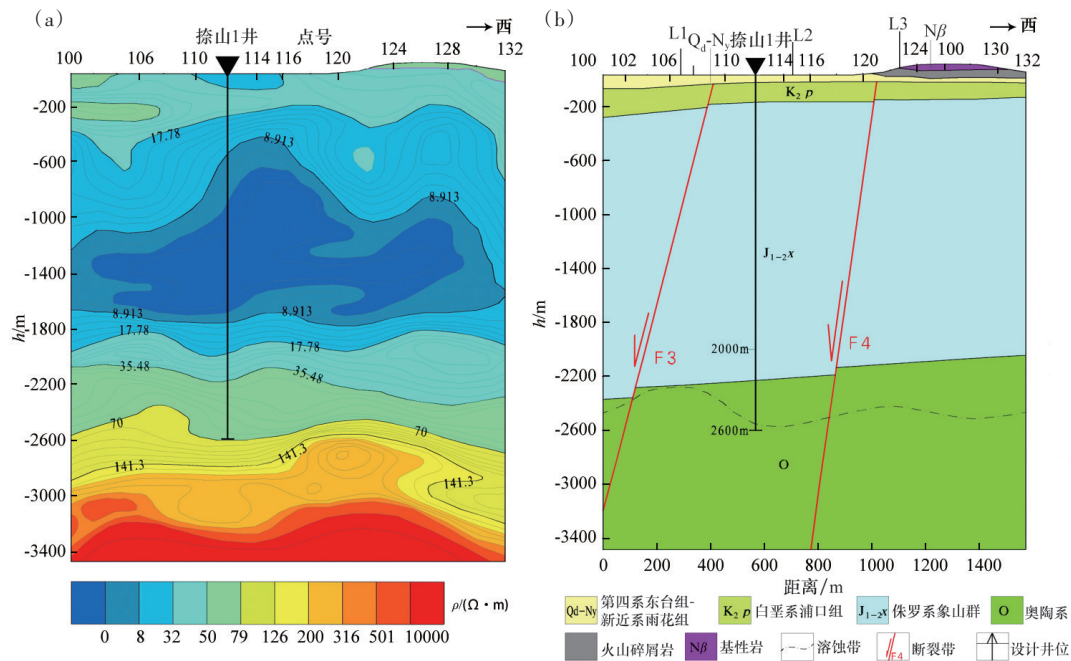


图4 江苏仪征捺山地区WFEM106测线反演电阻率断面(a)及地质解释剖面(b)(据文献[29]修改)

预测深部热储的分布与埋藏深度,确定地热远景区。在条件较好的地区也可以用重力探测成果确定覆盖层的厚度,通过求重力水平梯度异常的方法研究断层,提供断层倾向、埋深、准确位置等有用信息。重力剖面测量对推断局部断裂分布、产状以及储层和盖层的埋深具有一定参考价值。

使用重力测量时,被探测的地质体与围岩的密度需要存在一定的差别,并且有足够大的体积。区域性重力资料用于对选区的确定,通过测量不同地质体密度差异所引起的重力异常,来寻找深大断裂、拗陷中的凸起构造等地下热水存在的有利部位。区内不同断代地层之间存在一定的密度差异,具备重力勘探的地球物理前提。重力探测仪器体积小,操作简便,配合其他方法进行综合地质解释,效果较好。

浙江嘉兴王店区域重力图如图5所示,重力高的区域反映古生界或元古界基底隆起,重力低的区域则主要反映中、新生代沉积凹陷,并突出了局部异常,北东向和近东西向的梯度带推测为断裂构造发育带。经王店WR1井钻探验证,该井成功揭示了水温 $39.1\sim 39.6^{\circ}\text{C}$ 、水量 $371\text{ m}^3/\text{d}$ 的地热流体。

浙江象山爵溪地区大面积出露燕山晚期钾长花岗岩,如无构造切割、破坏或基底起伏,重力值表现应比较平缓。重力剖面测量成果图显示,在F1断裂通过的区域(图6中420~700),重力值出现上下波动,形成梯级带,结合氦气测量、地面调查等其他手段,F1断裂位置与重力剖面测量成果相符。经钻探验证,东铭1井构造裂隙地热流体温度 $50.4\sim 58.1^{\circ}\text{C}$ ,水量 $562\text{ m}^3/\text{d}$ 。

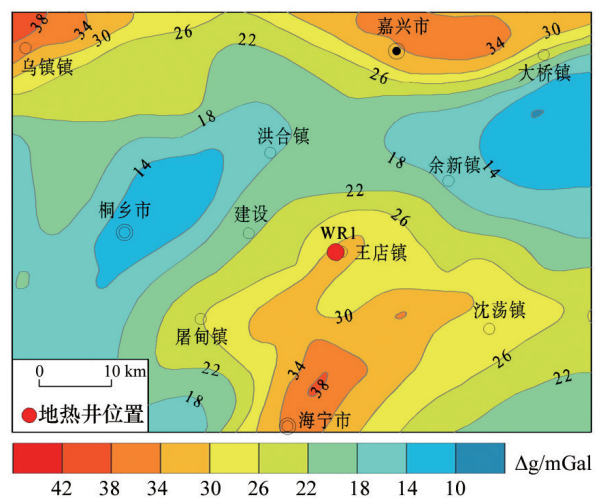


图5 浙江嘉兴王店区域布格重力异常图

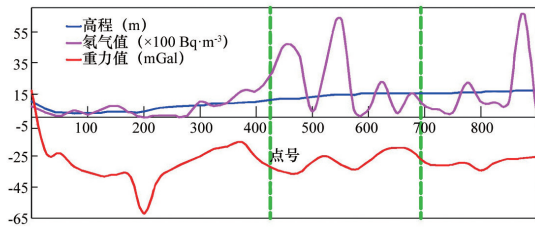


图6 浙江象山爵溪东铭1井重力剖面测量成果图

从应用情况看,重力勘探也存在局限性,其成果只能反映基底断距较大,而且两盘基岩顶面有显著高差的断层或者是水平方向宽度大的断裂带,对这些断裂带也只能定其延伸方向而无法断定其性质。由于重力反演存在多解性,因此,必须依靠研究区的地质、钻井、岩石密度和其他物探资料来减少反演的多解性,才能取得较好的解释效果。

#### 2.2.4 磁法勘探

磁法主要用于判断高磁性地质体的分布,根据磁异常的特点可以推断地质体的形状、埋深、走向、倾斜及引起磁异常的原因,广泛应用于寻找矿产、石油和天然气、地热资源、地下水等<sup>[31]</sup>。沉积岩的

磁化率通常比岩浆岩和变质岩的磁化率低几个数量级。在岩浆岩中,基性及超基性岩的磁性最强,酸性岩弱磁性或无磁性。变质岩的磁性决定于原岩的成分及变质过程中的化学变化。用磁法勘探可以发现覆盖区岩浆岩以及浅埋变质基底的分布。在沉积岩区,利用磁法可以发现侵入岩体以及断裂构造<sup>[32]</sup>。磁法测量分为区域性测量和剖面性测量。通过测量不同磁化强度的各种地质体在地磁场中所引起的磁异常,并通过研究这些异常的空间分布特征、规律与地质体间关系,从而作出合理的地质解释。

上海崇明岛西部地热勘查中,利用区域重磁数据反演了断裂构造、基岩面埋深、印支侵蚀面、高密度层(碳酸盐岩顶界面)埋深、火山(碎屑)岩底界、变质基底面等(图7)。对控制地质体边界的高精度磁法剖面数据进行了定量反演,结合重力、CSAMT和微动测深等方法,确定了工区侵入岩体和具有较强磁性的火山岩的分布。经过钻探验证,解释结果总体上与区域地质构造格架吻合较好。

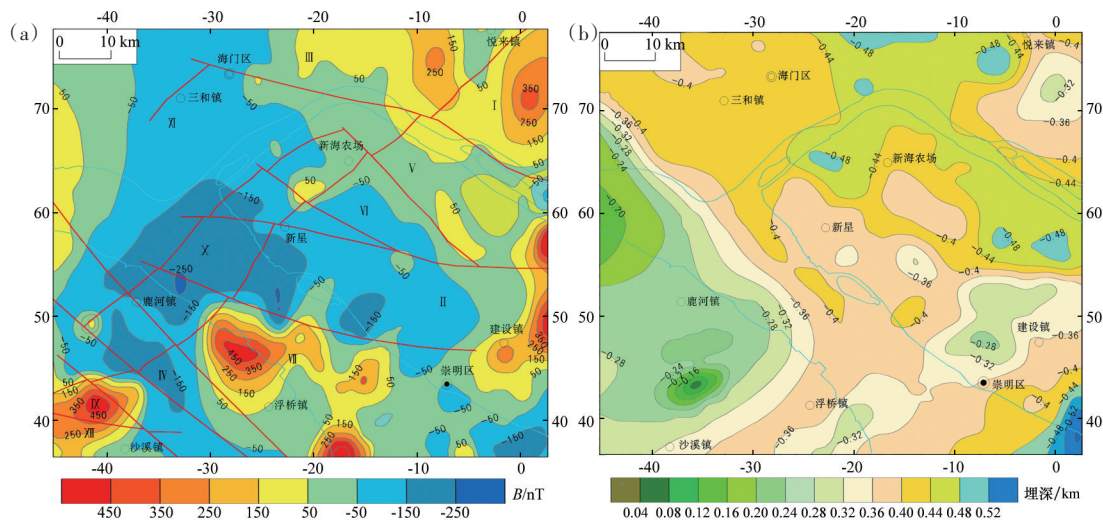


图7 崇明岛西部断裂与航磁化极异常图(a)、基岩面埋深图(b)

浙江嘉兴运河农场地区磁异常影像图(图8)可以看出,运热1井位于高磁异常区域,而运热2井所在区域并未见明显磁异常。运河1井实际钻探过程中揭露了36 m厚的玄武岩层,初步认定是该岩石层造成了该区的高磁异常。而运热2井实际

钻探过程中揭露多是砂岩、泥岩、大量灰岩,这些岩石层呈现的是弱磁或无磁特性,虽然有少量玄武岩揭露,但数量太少没有形成规模,这些岩石层分布特征造成了运热2井所在区域磁异常特征不明显。火山岩层发育良好的地区早期构造活动一般都很

活跃,岩石裂隙丰富,赋水性好。同时,岩溶发育,可以和碳酸盐岩形成良好的热储,运热1井钻探验证显示,出水水温 $64^{\circ}\text{C}$ ,出水量达 $2000\text{ m}^3/\text{d}$ 。

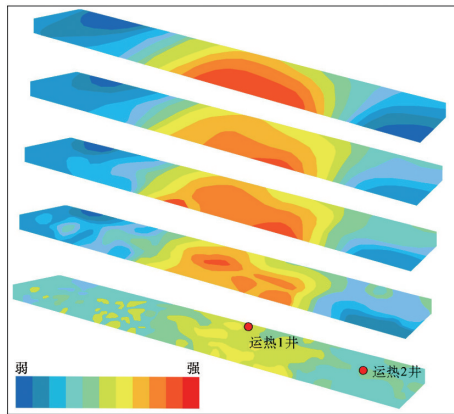


图8 浙江嘉兴运河农场地区原始磁异常及向上延拓100~400 m磁异常解释图

磁法勘探在长三角地区地热勘探中得到较广泛的应用。地面磁异常数值的大小直接反映磁性地层埋藏深浅。区内广泛发育侏罗系火山岩盆地,常为高磁异常区,通过反演,对火山岩地层厚度及其下的碳酸盐岩储层深度进行初步推测。在岩浆岩分布区,可适当补充高精度磁测工作,圈定岩体分布位置,避免将地热井布置在岩体上而造成不必要的损失。

### 2.2.5 微动勘查

微动勘查方法(MSM)是从天然场源微动信号中采用空间自相关法提取瑞雷波的频散曲线,通过对频散曲线的反演,获得地下介质S波速度结构的

地球物理探测新技术<sup>[33]</sup>。该方法无需人工源,测点布设比较灵活、不受工业电磁场、浅层高速层、海水侵入等低阻高导层屏蔽作用影响,对深部低速层的分辨能力高于其他地球物理方法,对断层破碎带、采空区(空洞)、陷落柱等构造、岩性突变导致的低速区域敏感,探测效果较好<sup>[33]</sup>。微动测深的物理前提是基于不同时代沉积地层之间存在的波速差异。长三角地区可划分出4~5个速度层,如新生界、中生界、古生界、元古界、古元古界等,其波速差异较为明显,形成了由低到高可以识别的物性界面。微动探测技术利用的是面波,不受浅层高速层屏蔽影响,对深部低速层的分辨能力优于其他物探方法<sup>[34]</sup>。由于含水的地层破碎带S波速度与周围有明显差异,因此,用该方法可以有效探测并圈定速度异常体的边界。

江苏是长三角地区最先把该方法应用于地热资源调查的省份,目前积累了实测点90多个测点数据和探测成果,在地热资源勘查工作中发挥了一定作用。微动探测可选择单点测量和剖面测量。单点测量相当于虚拟钻孔,适用于地下介质成层性好的地区,反演获得的台阵下方介质的S波速度结构可用于盆地结构调查、热储盖层分层,基岩面调查等;剖面探测是指沿剖面进行多个点的探测,以形成二维微动视S波速度剖面,该方法适用于探测隐伏断裂构造和地热钻井选址。

#### 1) 微动单点探测与热储层划分。

图9(a)为江苏常熟梅李地区实测的频散曲线与理论频散曲线,图9(b)为分别采用遗传算法

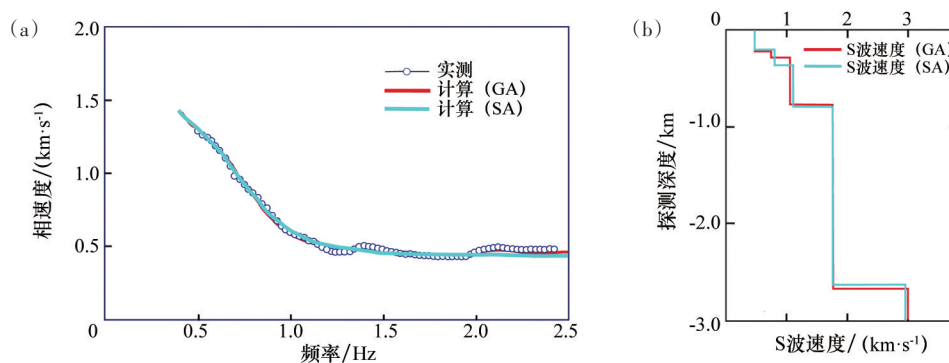


图9 江苏常熟梅李地区频散曲线(a)与反演S波速度结构图(b)(据文献[35]修改)

(GA)和模拟退火算法(SA)反演得出的地下S波速度结构。利用MSM技术,通过调整探测半径的大小,可较为精确探测3 km以浅的地热储层(表1、表

2)。可以看出,与实际揭露地层底界深度相比,该方法可以较为有效地将误差控制在10%以内。

表1 江苏常熟梅李遗传算法反演结果与钻孔数据对比表(据文献[35]修改)

推测地层(代号)	岩性	钻孔底界深度/m	层速度 $V/s \cdot km^{-1}$	层厚/m	地层底界深度/m	绝对误差	相对误差
Q—N	粉砂、黏土	230	0.475	235	235	5	2.2%
			0.84	50	285	—	—
$K_2p$	钙质泥岩、粉砂岩、细砂岩	895	1.075	500	785	110	12.3%
$J_3l$	紫红色砂岩、粉砂岩、泥岩	1540	1.65	750	1535	5	0.3%
$P_2l$	砂岩、粉砂岩、炭质页岩夹煤层	1795	2.05	—	—	—	—
$C_2h$ 、 $C_2P_{1c}$ 、 $P_2q$	灰岩	2518	3.0	845	2380	138	5.5%

表2 江苏常熟梅李模拟退火算法反演结果与钻孔数据对比表

推测地层(代号)	岩性	钻孔底界深度/m	层速度 $V/s \cdot km^{-1}$	层厚/m	地层底界深度/m	绝对误差	相对误差
Q—N	粉砂、黏土	230	0.458	202	202	28	13.9%
			0.795	168	370	—	—
$K_2p$	钙质泥岩、粉砂岩、细砂岩	895	1.105	427	797	98	10.9%
$J_3l$	紫红色砂岩、粉砂岩、泥岩	1540	—	—	—	—	—
$P_{2-3}l$	砂岩、粉砂岩、炭质页岩夹煤层	1795	—	—	—	—	—
$C_2h$ 、 $C_2P_{1c}$ 、 $P_2q$	灰岩	2518	1.750	1840	2637	119	4.7%

## 2) 微动剖面探测与储热构造确定。

对于探测控热构造(隐伏断裂构造),二维微动剖面探测技术在不同地区均取得很好探测效果<sup>[35-39]</sup>。微动剖面探测技术是在已经得到的瑞雷波频散曲线的基础上,通过对频散曲线的计算得到各点下方的视S波速度,进而在剖面上进行插值,得到视S波速度剖面,用以进行地质推断和解释<sup>[40]</sup>。含地热流体的隐伏断裂破碎带在微动视S波速度剖面上显示为低速异常,是微动剖面识别、解释隐伏地热构造的重要标志。在江苏吴江菀坪地区地热勘查中,微动探测剖面(图10)在浅部0~300 m范围内的地层基本未受影响,中部300~600 m,低速异常体与两侧地层的速度差异不大,但在600 m以下速度差异增大。D点下方发现低速异常体(图10白色虚线位置)。在900~1400 m深度内宽约50 m,往下宽度略有增加。低速体解释为含水破碎

带,结合CSAMT方法,确定了地热井位。经钻探验证出水量383 m<sup>3</sup>/d,井口水温46℃。

安徽含山县昭关温泉水温39~42℃,涌水量1000 m<sup>3</sup>/d。图11为含山1线二维微动视S波速度剖面的钻孔验证情况,视S波速度速度总体随地层深度增加而增加,异常基本呈水平层状分布。将已知钻孔HXK01沿断层走向投影在5~6号点之间的位置,可见钻孔位置处左右两侧视S波速度差异较大,对应断裂含水构造附近。由此可见,微动对带状热储有较好的勘探效果,可以很好的识别拉张型的正断层,低速异常与破碎、含水构造有较好的对应关系,热储区与低速异常对应,600 m以上的热储和断层获得有效识别。

上海宝山区罗店地区的上海远洋·博堡别墅项目、崇明岛西部的湖苏断裂(上海段)地质构造特征调查项目中也先后采用了微动勘探方法。相关结

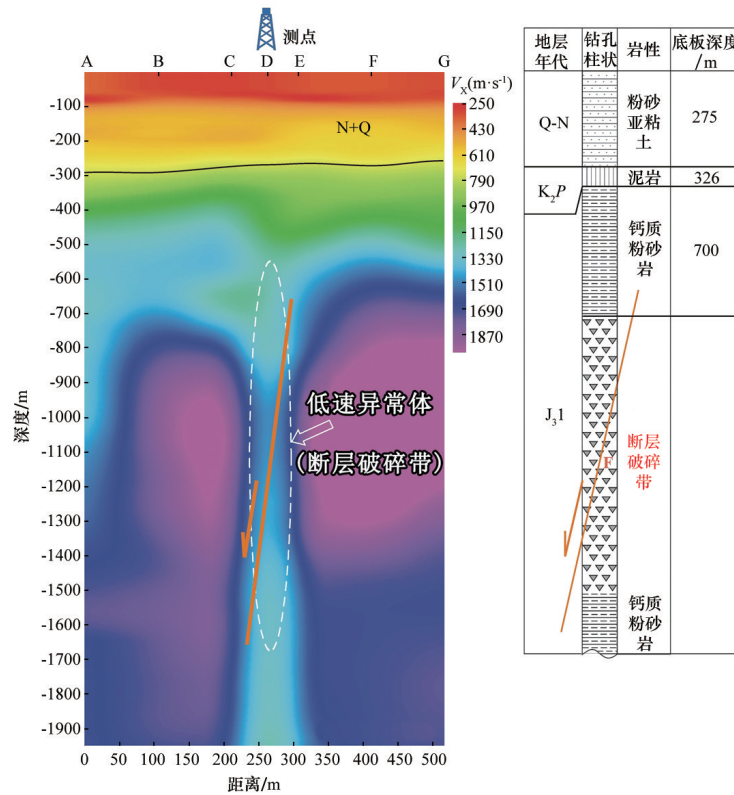


图10 江苏吴江菀坪地区微动探测地质解释剖面图

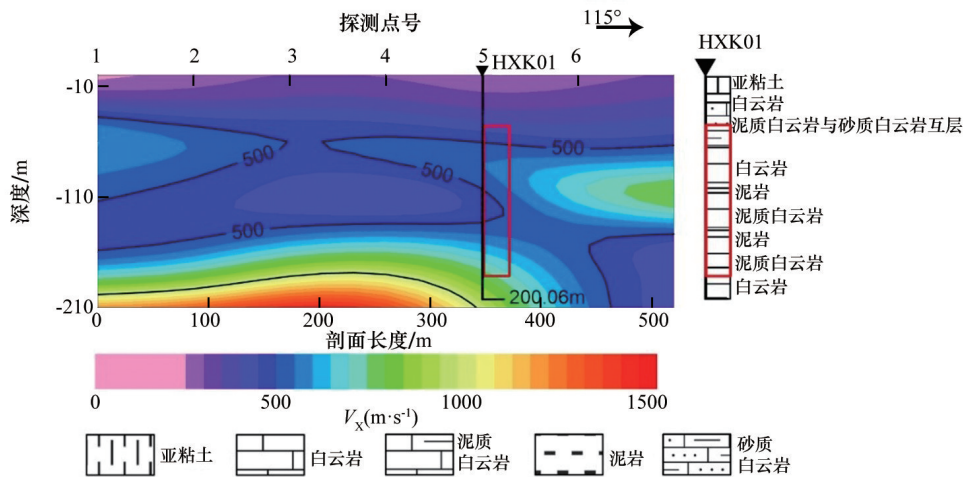


图11 安徽含山1线二维视S波速度剖面图与钻孔验证

果表明,微动勘查方法对规模较大的断裂破碎带或差异较大的物性层具有明显效果,能有效圈定地热热储含水破碎带区域。

### 2.2.6 地温测量

地温测量在地热资源勘查中得到广泛应用。通过地温测量圈出地热异常区,大致推断出地下热

水的分布范围,或反映出在一定深度上的地热异常中心位置,指导勘查深部的隐伏热储。地温测量分为米测温 and 浅层钻孔测温。

米测温主要用于第四系浅覆盖区,寻找地热异常和蓄水构造。测温深度1~5 m,应用米测温时需要排除干扰因素,如大气温度的周期性变化常会引

起浅部第四系温度变化。不同土壤、地层岩性、地形起伏、地下水流动以及植被等也会对测温值产生影响。因此,在应用时需要进行校正,否则会得出错误的结论。

浅层钻孔测温主要用于第四系厚覆盖区,恒温层以下地温不受季节性气温变化影响。测温深度应穿透恒温层,可以较好地发现地热异常。长三角地区恒温层深度一般不超过 25 m,考虑实际应用效果和经济学,测温深度选择 30~40 m 为宜。江苏南通的小洋口地热勘查中,开展了 40 m 深度的面积性地层测温(使用工程地质钻机进行小口径钻探,埋入直径 2.5 cm 底部封闭的 PVC 管,埋管 24 h 后用热敏电阻测温仪测量孔底温度),用于寻找地温异常、发现控热构造、圈定地热田边界取得了很好的效果(图 12),异常范围内 40 m 深度平均地温达 20℃左右,高于正常区 4~5℃(正常区 16℃),呈北西向展布,与北西向断裂构造带(F2)吻合。小洋口地热田存在浅部孔隙型地热资源(传导型地热系统)和深部裂隙型地热资源(对流型地热系统),浅表地温异常(热)、CSAMT 低电阻率异常(阻)、微动勘查 S 波低速异常(波),是该类地热系统(隐伏对流型)的重要标志,通过地温测量,圈定地热异常,为勘探深部地热资源提供方向和依据。勘查结果显示,小洋口地热田自下而上分布有新近纪盐城组

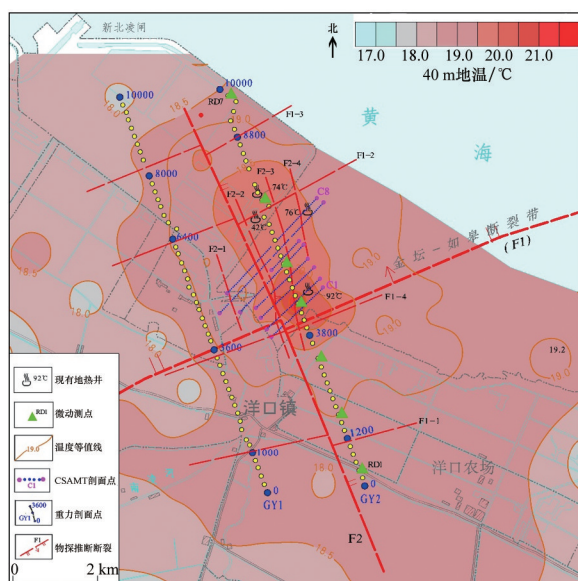


图 12 江苏如东小洋口地区浅层地温分布图

松散层、古近纪泰州组白云岩-砂岩、石炭纪一二叠纪砂岩-灰岩三套热储层,水温 36~92℃,出水量 1950~3506 m<sup>3</sup>/d。

### 2.2.7 地球物理方法组合

不同地热资源区在成因、地质条件、热储结构及地热流体化学成分等方面都存在较大的差异。因此,在中深层地热资源勘查过程中,应针对不同地热地质条件、不同勘查阶段,选择适宜的勘查技术和有效的方法组合,确保取得良好的勘探效果,达到合理投入、降低风险、提高经济效益的目的。长三角地区地热勘查工作实践证明,电磁法是目前采用的主流勘查方法之一,特别是 CSAMT 和 WFEM,取得了良好的勘查效果,可以直接用于深部地热流体的识别。

地热流体一般赋存在未固结松散岩类的孔隙、各种基岩的裂隙和洞穴中。埋藏深度不大的孔隙型地热资源大多数分布在新近系松散地层中,热储层是砂层和砂砾层,一般呈层状或长透镜状分布,盖层一般为泥岩或黏土,在反演电阻率断面图上一般显示热储层的电阻率要高于盖层。结合 MSM 进行综合地质解释,较容易的识别出热储层的分布及埋深等。

埋藏深度较大的基岩裂隙或岩溶型地热资源,一般与断裂构造或构造运动界面密切相关。这类地热流体一般赋存在断裂裂隙或岩溶裂隙中,多呈带状或似层状分布,电阻率一般比围岩要低许多,通过 CSAMT、WFEM,结合 MSM 可以识别出含地热流体构造的分布、产状等。另有一类地热资源分布在沉积盆地与隆起区的交界部位,地热流体往往与盆地边界深断裂有关,有时也存在隐伏地热异常,可以通过浅孔测温、高精度重力测量、CSAMT、WFEM 等方法进行探测。

埋藏深度较浅的对流型地热资源,多分布在隆起区或山前地带,平面上呈带状或点状分布,常形成地热异常带,这类地热资源都经过了深部水热循环,流体中含有较多的矿物质和放射性氦气等,通过浅孔地温测量和氦气测量,结合电法或电磁法勘探,能较准确地判断控热构造的分布、走向以及地热流体的赋存位置。

通过对长三角地区地热勘查中应用的各种方法有效性对比分析,应用效果较好的方法是重力、磁法、CSAMT、WFEM、MSM、电测深、地温测量等。这些方法理论成熟,并经多年国内外应用,取得了较好的应用效果。但物探方法在经济发达的城镇区开展,其观测数据均会受到外界干扰信号影响,同时地理环境影响、观测质量不高等因素,使单一物探方法解释推断产生误差。因此,采用单一的物探方法进行解释推断有时误差较大,可能会得出片面的结论。为了减小物探推断误差,除了提高单方法本身的能力外,采用多方法组合勘探是必要的。多种方法组合在一起,可以相互弥补,取长补短。以不同的物性前提来论证同一目标物,会得到合理、客观的推断结论。

地热勘查中的地球物理工作应由多方法组合完成,特别是要根据地质任务合理选择不同类方法

(平面测量和测深方法)进行组合(表3)。各种技术方法选择的物理前提是目标地层(储层)与围岩地层(盖层)的物性差异。且这种差异应足够大才能反映到物理场中,通过仪器观测到。如在中新生代凹陷中,新近系、古近系、白垩系盖层都是低电阻率地层,而盆地基底碳酸盐岩都是高电阻率,两者之间物性差异明显,采用电磁法和MSM方法探测热储层的效果就比较好。如果在隆起区,特别是侏罗系火山岩分布区,要探测其下的三叠纪碳酸盐岩(如青龙组)或石炭纪-二叠纪碳酸盐岩(如栖霞组、船山组、黄龙组、老虎洞组)热储层,由于火山岩与碳酸盐岩之间电阻率差异不明显,这时用电磁方法将不会取得好的效果。可以利用岩石的其他物性差异,如密度差异,选择MSM等方法,根据波速差异进行地层划分。

表3 长三角地区不同地质构造单元地热勘查物探方法组合

构造单元	确定勘查区	确定井位	地热系统类型	备注
隆起区	重力、航磁	CSAMT、WFEM、MSM	深埋传导型热储(岩溶或裂隙)	在浅部有厚度较大的咸水含水层分布的地区,有低阻屏蔽,CSAMT和大极距电阻率测深效果不好
		CSAMT、浅孔测温、测氦	浅埋对流型热储(岩溶或裂隙)	
凹陷区	重力、航磁	MSM、CSAMT	深埋传导型热储(孔隙)	
凹陷或隆起区边缘	重力、航磁	CSAMT、MSM、WFEM、高精度重力、浅孔测温	深埋对流型或传导型热储(裂隙或岩溶)	

目前用于勘探地热的地球物理技术很多,特点各不相同,效果与成本也各异,使用时要有主有次、相互补充、综合解释,在今后的地热勘查中,根据不同地质构造背景、区域物性特征,尽可能应用这些物探方法,按照合理的程序开展工作,解释推断时要充分参考区域地质构造情况,且不可就物探而物探,孤立地解释分析。重力勘探数据受干扰最小,工作条件受限制也少,可借助已知钻孔资料及地层密度特征,做进一步的定量解释。侏罗纪火山盆地广泛分布火山岩的厚度与分布是地热勘查中必须考虑的因素,应用航磁资料研究火山岩的分布、预测火山岩厚度,勘查成果显示,长三角地区火山岩断裂裂隙中赋存有丰富的地下热水资源,具有较好的勘查开发前景,目前已经在江苏(溧阳、吴江、宿迁等)、浙江、安徽等地勘查成功数口地热井。

### 2.3 地球化学勘查

地球化学方法是地热勘查中应用较广的方法之一。地热流体赋存于岩石孔隙和裂隙中,在运移循环过程中与围岩发生水岩作用,在地热流体中富集了某些特殊的化学成分,如Rn、Hg、Br、B、Li、F、I、Ba、Zn、Mn、Sr、矿化度、二氧化碳、总硫化氢、偏硅酸、偏硼酸等。在浅部水热活动比较强烈的地区,这些元素的含量远高于区域背景值和地壳中的丰度。因此,通过分析土壤中和地下水中某些特殊元素的富集规律,判断地下热储构造的分布情况,发现控热断裂,圈定地热异常范围。如汞、氡等具有强烈的挥发性和迁移能力,当有构造通道时,可以从深处迁移至地表,在岩土体和地下水中积聚下来,形成明显的地球化学异常。利用地热流体中 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 阳离子化学温标和 $SiO_2$ 温标估算

热储温度和深度。利用 $\delta_D - \delta_{18O}$ 等稳定同位素研究地热系统成因。

### 2.3.1 氦气测量

氦气测量是一种使用测氦仪测量土壤、第四系、地下水中的氦气浓度,通过分析氦气浓度的分布特征来解释某些地质问题的一种放射性测方法。氦气来源于深部地质体,以游离原子的形式,沿着岩石的孔隙或裂隙系统迁移。氦气也易溶于水,在某些地热流体中富集有氦,断裂破碎带的发育为氦气的运移提供了良好的通道<sup>[41]</sup>。当有构造破碎带存在时,氦气沿着断裂破碎带富集,并向上运移至地表富集,从而形成氦异常<sup>[42]</sup>。因此,通过测量浅层地下水和岩土中的氦气,可以发现断裂破碎带,结合地温测量等方法,可以发现地热异常。

氦气测量适用于第四系浅覆盖区,如已知温泉

分布区或潜在地热分布区,配合地温测量用于寻找隐伏含水断裂破碎带和地热异常。江苏南京汤山地区布置的两条测氦剖面结果显示(图13):放射性氦含量 $0 \sim 10000 \text{ Bq/m}^3$ ,平均值为 $638 \text{ Bq/m}^3$ ,其中氦值大于 $1500 \text{ Bq/m}^3$ 的测点多分布在上案子桥东南部和丁墅村东南部地区,在剖面上表现尤为明显。剖面1、2曲线的前段氦值变化起伏不大,氦1线在测点号4200、5250、5300、5400、5450的氦值变化幅度大,氦值在 $3300 \sim 10000 \text{ Bq/m}^3$ ;测氦2线在测点号为4300、4450、4908、5100时的氦值变化幅度大,氦值在 $4600 \sim 10000 \text{ Bq/m}^3$ 。氦异常特征呈高而密集的多尖峰群,也指示了隐伏断裂破碎带的存在,依据测氦结果,推断出两条北东向断裂,在其中一条断裂布置了钻探,成功钻探到水温 $73^\circ\text{C}$ 的地热水资源。

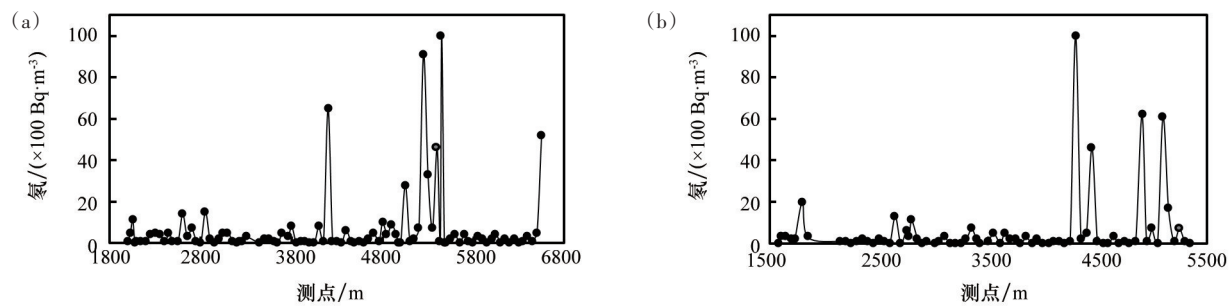


图13 江苏南京汤山地区放射性氦测量1剖面(a)、2剖面(b)曲线图

### 2.3.2 地球化学温标

利用地热流体中的某些化学组分的含量与温度的关系,即地球化学温标法估算深部热储温度。常用的有阳离子地热温标(包括Na-K温标、Na-K-Ca温标、多矿物平衡化学温标等)、 $\text{SiO}_2$ 地热温标、同位素地热温标以及气体温标4大类<sup>[43]</sup>。它是以地热流体与矿物之间在热储温度下达到化学平衡为基本前提,地热流体在上升过程中,温度下降,但化学组分含量几乎不变,因此,可以用来估算水岩反应的平衡温度,即深部热储的温度。同位素技术的发展在地热系统研究中得到广泛应用,利用同位素推测水热循环深度、热储深度,研究地热系统成因等<sup>[44]</sup>。

江苏省地质调查研究院与中国科学院地质与地球物理研究所合作开展的“建湖隆起地热成因与资源评价研究”项目,利用地球化学方法研究了江苏洪泽老子山地热资源成因,估算了深度地热流体温度等。对于处于Na-K-Mg三角图中未成熟区的水样,地热流体有发生混合作用的可能,直接使用阳离子地热温标估算热储温度并不合理,选择 $\text{SiO}_2$ 地热温标进行计算更适合<sup>[43]</sup>。对于常见硅矿物,在蒸汽压下溶解度随温度变化的曲线已由实验测定。在低于 $300^\circ\text{C}$ 时,压力和附加盐度对石英和无定形 $\text{SiO}_2$ 的溶解度几乎没有什么影响。这一特点使硅能作为地热温标成为可能,并可使用专门的经验公式<sup>[45]</sup>计算热储温度,使用该方法计算得到江苏洪泽

老子山地下热水热储温度范围为70~100℃,符合实际温度。

利用同位素分析地下热水成因效果较好,绝大部分地热系统中的热水来自大气降水。因而在研究一个新地区地下热水补给源的时候,首先应该探讨它与当地大气降水线之间的关系。地下热水的起源可以通过其在 $\delta_D - \delta_{18O}$ 关系图上的位置,特别是与大气降水之间的关系判断(图14)。理论上大气降水的氢氧稳定同位素 $\delta_{18O}$ 和 $\delta_D$ 随着降水高度的增大而减小,即具有高程效应<sup>[46]</sup>。利用大气降水同位素的这种变化规律及地形资料可确定洪泽老子山地下热水的补给高程和补给区,结合补给区地热梯度、恒温带深度、年平均温度等基础资料,可以推测该地区地下热水的循环深度。

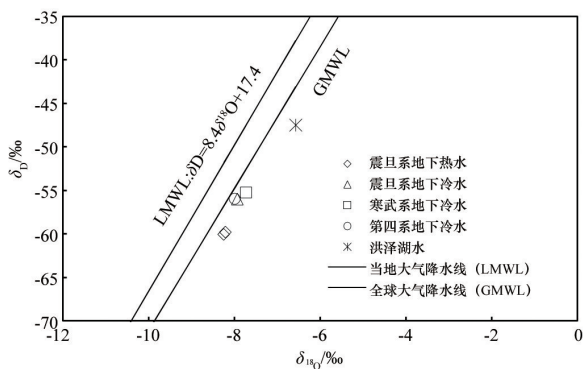


图14 江苏洪泽老子山地区地下热水及其他天然水 $\delta_D - \delta_{18O}$ 关系

## 2.4 地热钻井

地热钻井是地热资源勘查中最重要的一项工作,一口地热井能否成功出水,除了钻井成井工艺外,洗井方法至关重要。长三角地区现有地热井主要热储类型大致可划分为岩溶型、孔隙型、裂隙型3大类,热储岩性多样,结构复杂,不同的储层之上覆盖的地层多变,岩性软硬交互。三省一市在地热钻井实践中积累了较多的钻井经验,形成了一套较完善的钻井技术方法。

### 2.4.1 不同地热类型钻井成井技术

#### 1) 岩溶型地热井。

岩溶裂隙型储层主要分布在碳酸盐岩地层中。

热储岩性脆,硬度不大,该类储层极易钻遇溶洞而发生泥浆漏失,因此,对碳酸盐岩地层可采用气举反循环钻进工艺,清水作为循环介质,牙轮钻头。如果热储之上覆盖有石炭-二叠纪煤系或新生代松散地层,应采用正循环钻井工艺,PDC钻头可大大提高钻进效率。钻遇该类地层时,易出现塌孔、缩径等现象,井内事故率高,需要采取防塌、防缩等各种措施,确保钻进安全。

取水层段采用裸眼成井或滤水管成井。

#### 2) 孔隙型地热井。

孔隙型地热井主要分布于新生代地层中。热储岩性一般为砂层、砂砾层,常夹有泥岩等,岩性松软,钻井速度快,但孔壁不稳定,容易出现垮塌、缩径等现象,成井有一定难度。一般采用正循环泥浆钻井,PDC钻头。需要做好泥浆密度配比、压力平衡,确保井壁安全。

通过测井确定热储层和井温。全孔下入套管,取水层段采用缠丝滤水管成井。

#### 3) 裂隙型地热井。

裂隙型地热井在长三角地热井中占据了主要部分。热储层岩性主要有花岗岩、闪长岩、安山岩、片麻岩、变粒岩、石英岩、砂岩、火山岩碎屑岩等。岩性硬度大,钻井速度较慢,但井壁相对稳定,较少出现垮塌现象。一般采用正循环泥浆钻井,牙轮钻头。但在部分地区上覆有二叠纪煤系地层,同样会出现垮塌、缩径等井内事故,需采取预防措施。

取水层段采用裸眼成井或滤水管成井。

### 2.4.2 效果良好的常用洗井方法

洗井是地热钻井的关键技术之一。地热井有裸眼成井和滤水管成井2种方式,为了最大限度地获取最大的产能,地热井固井后都要经过洗井过程,使地热井的水量、水温达到或超过设计或合同指标的要求。常见的洗井方法有水泵抽水洗井、喷射洗井、压缩空气洗井、多磷酸盐洗井、酸化洗井、液态二氧化碳洗井、活塞洗井、压水洗井地热井等。上述各种洗井方法一般不单独使用,针对地热井实际情况采用几种洗井方法组合在一起使用,形成完整的洗井作业程序。

#### 1) 喷射洗井。

地热井固井完成后,进行喷射洗井,用泥浆泵注清水稀释置换泥浆,有些地热井由于各种原因,停待时间很长,给后续洗井工作带来较大的困难。这时需要用钢丝刷刷刮井壁,采用侧喷冲井器喷射井壁,扰动解除粘结的泥皮。主要含水层井段要增加次数。方向上要从下向上进行,取水井段喷射洗井结束后,将侧喷冲井器下至井底继续清水换浆,直到井口返液较清和基本不含泥砂为止。

适用条件:基岩裂隙型地热井、孔隙型地热井。

#### 2) 多磷酸盐洗井。

多磷酸盐洗井的原理就是泥浆中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子与多磷酸钠盐发生作用,形成水性络离子,破坏泥皮的固体结构成为液体泥浆状态,使井壁的泥皮得以清除。生产中常用的多磷酸钠盐有焦磷酸钠、六偏磷酸钠和三聚磷酸钠。洗井液的配制浓度一般不小于1%。钻进周期长、泥浆密度大,应增加洗井液浓度,洗井液在井中需浸泡24 h。

适用条件:岩溶型地热井、裂隙型地热井、孔隙型地热井。

#### 3) 压缩空气洗井。

地热井压缩空气洗井一般采用石油钻井行业的高压高排量的空气压缩机,常用空气压缩机的能力为  $10 \text{ m}^3/150 \text{ kg}$ 。采用反冲洗的作业方法,风管采用钻杆,下入深度一般500~1000 m。压缩空气洗井产生间断喷流的出水方式(水量大时连续出水),喷流高度可达几米至十几米,井中的水柱上下振荡幅度几百米,几百米水柱压力的瞬间释放有助于含水层的疏通出水。根据出水持续时间和间断时间的比例可估算地热井的出水能力。压缩空气洗井结束后,一般采用水泵抽水洗井。

适用条件:岩溶型地热井、裂隙型地热井。

#### 4) 水泵抽水洗井。

借助潜水泵抽水来达到洗井的目的,根据地热井尺寸与深度等,选择流量与扬程适合的潜水泵,通过水泵大排量抽水洗井,有助于快速排净井中的泥浆和细的岩粉,达到水清砂净。对于富水性较差的地热井,可配合活塞洗井,通过拉动活塞引起的井水振荡作用对深部含水层进行疏通。

适用条件:岩溶型地热井、断裂裂隙型地热井。

#### 5) 压水洗井。

用泥浆泵及钻杆向含水层高压注入清水,水流冲蚀裂隙中的堵塞物,同时对裂隙和岩石有一定的破裂作用。

适用条件:地层泥浆漏失严重、岩屑严重堵塞了裂隙通道的地热井。

#### 6) 液态二氧化碳洗井。

对于几千米深的地热井,需要配合泥浆泵的高压水流同步携带液态二氧化碳注入井中。液态二氧化碳在注入井中的过程中,形成的高压混合流对井壁泥皮和孔隙裂隙中的堵塞物有冲刷扰动作用。井喷后液态二氧化碳瞬间气化,将携带的泥浆、岩屑等污染物喷出井口,疏通孔隙、裂隙的通道,同时井内形成负压,含水层内的水快速流入井中,将通道中的堵塞物冲刷干净。液态二氧化碳注入后一般需要空气压缩机进行气举引喷。

适用条件:裂隙型地热井。

#### 7) 酸化压裂洗井。

使用机械设备和先进技术使岩体受到压力,产生新的裂缝或使原有的裂缝规模扩大,再通过酸化,溶解缝隙中的堵塞物,同时扩大岩石之间的空隙,增加储层的渗透性,提高地热井出水量。采用的酸主要有盐酸和氢氟酸。针对不同井段可采用不同注酸方案,在没有出现强漏段时,一般采用一次性全部注酸。出现强漏段时,可越过此段,进行分段注酸。压裂洗井常与酸化洗井相结合。江苏沛县地热井、南京汤山地热深井通过酸化压裂洗井,单井出水量得到了大大提高。

适用条件:盐酸主要用于热储层为碳酸盐岩岩溶型地热井和裂隙型地热井;氢氟酸一般用于碎屑岩、岩浆岩、变质岩等裂隙型地热井。

## 3 结论

1) 在中深层地热资源勘查过程中,应针对不同地地质条件、不同勘查阶段,选择适宜的勘查技术方法和有效的方法组合,确保取得良好的勘探效果。

2) 长三角地区地热勘查采用的主要方法有地

热地质调查、地球物理勘查、地球化学勘查、地热钻井等,其中重力、磁法、CSAMT、WFEM、MSM、电测深、地温测量是最常用的地球物理技术。重力和磁法勘探适用于探测沉积盆地基底、断裂构造、岩浆岩分布等信息。可控源音频大地电磁测深(CSAMT)和广域电磁能有效探测隐伏基岩岩性和富水断裂位置,精度高,是确定地热井位最有效的技术方法。受浅层高速层屏蔽影响,对深部低速层的分辨能力MSM优于其他物探方法。地温测量和氦气测量用于圈定地热异常,判定导水断裂,是浅覆盖区勘查对流型地热资源最有效的手段。在水热活动比较强烈的地区,通过分析土壤和地下水中某些特殊元素的富集规律,判断地下热储构造、圈定地热异常范围。估算深部热储温度大多使用阳离子地热温标、SiO<sub>2</sub>地热温标等地球化学温标,利用氢氧稳定同位素(D、<sup>18</sup>O)及地形资料推测地下热水的补给高程、补给区等,结合地温梯度、恒温度的深度与温度等资料推测地下热水的循环深度,研究地热系统的成因。

3) 在不同地质构造单元勘查地热资源应采用不同的技术方法组合。在构造隆起区,勘查深埋传导型地热资源宜采用CSAMT、WFEM、MSM、重力以及磁法组合。勘查浅层对流型地热资源,宜采用CSAMT、测温、测氦组合;在沉积盆地地区,勘查传导型孔隙地热资源,采用CSAMT、MSM以及大极距电测深组合;在隆起与凹陷断阶带,勘查复合型地热资源,采用CSAMT、MSM、高精度重力以及浅孔测温组合。

4) 根据地热井地质特征,可采用一种或多种洗井方法组合作业。孔隙型地热井热储岩性松软,容易出现垮塌、缩径等现象,一般采用正循环泥浆钻井,全孔下入套管,取水层段采用缠丝滤水管成井。宜使用喷射洗井、多磷酸盐洗井等洗井方法。裂隙型地热井热储岩性硬度大,一般采用正循环泥浆钻井,取水层段采用裸眼成井或滤水管成井。适用喷射洗井、多磷酸盐洗井、液态二氧化碳洗井、压缩空气洗井等多种洗井方法。岩溶型地热井热储岩性脆,极易钻遇溶洞而发生泥浆漏失,可采用气举反循环与正循环钻进工艺,取水层段采用裸眼成

井或滤水管成井。酸化压裂洗井是提高岩溶-裂隙型地热井出水量最有效的方法。

## 参考文献(References)

- [1] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
- [2] Nicholson K. Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques[M]. Berlin: Springer, 2012.
- [3] 吴昊旻, 黄安宁, 黄旋旋. 近50年长三角地区季节的气候变化特征[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 317-324.
- [4] 王莹, 马红云, 李海俊. 长三角城市群夏季高温对未来全球增暖的响应[J]. 气象科学, 2021, 41(3): 285-294.
- [5] 谢建磊, 方正, 李金柱, 等. 上海市地热资源地质条件及开发利用潜力分析[J]. 上海地质, 2009(2): 4-10.
- [6] 吴海权, 杨则东, 疏浅, 等. 安徽省地热资源分布特征及开发利用建议[J]. 地质学刊, 2016, 40(1): 171-177.
- [7] 杜建国, 姚文江, 范迪富. 江苏地热资源类型及开发利用前景[J]. 地质学刊, 2012, 36(1): 86-91.
- [8] 韦毅, 毛官辉, 吕清, 等. 浙江省水热型地热资源特征及赋存规律[J]. 上海国土资源, 2022, 43(2): 93-98.
- [9] 陆衍. 论上海市地热资源物探勘查[J]. 上海国土资源, 2015, 36(1): 67-72.
- [10] 左丽琼, 王彩会, 荆慧, 等. 综合物探方法在南通小洋口地区地热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 122-129.
- [11] 杨林, 姜国庆. 中浅层构造裂隙型地热资源勘查中的综合地球物理方法——以苏南地区为例[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2265-2275.
- [12] 刘会毅, 徐坤, 国吉安, 等. 综合物探方法在安徽沱湖地区地热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(5): 648-654.
- [13] Zonge K L, Figgins S J, Hughes L J. Use of electrical geophysics to detect sources of groundwater contamination[G]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1985. Washington DC, USA: Society of Exploration Geophysicists, 1985: 147-149.
- [14] Nabighian M N. Electromagnetic methods in applied geophysics-applications, Part A and Part B[M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 1996: 713-807.
- [15] 袁桂琴, 熊盛青, 孟庆敏, 等. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1744-1805.
- [16] Sandberg S K, Hohmann G W. Controlled-source audiomagnetotellurics in geothermal exploration[J]. Geophysics, 1982, 47(1): 100-116.

- [17] 黄力军, 陆桂福, 刘瑞德. 可控源音频大地电磁测深法应用实例[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(4): 337-341.
- [18] Wu G J, Hu X Y, Huo G P, et al. Geophysical exploration for geothermal resources: An application of MT and CSAMT in Jiangxia, Wuhan, China[J]. Journal of Earth Science, Springer, 2012, 23(5): 757-767.
- [19] Fu C M, Di Q Y, An Z G. Application of the CSAMT method to groundwater exploration in a metropolitan environment[J]. Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 2013, 78(5): B201-B209.
- [20] Mustopa E J. 2D Interpretation of controlled source audio magnetotelluric (CSAMT) data integrated with borehole data in Kamojang geothermal field west Java, Indonesia[C]//Journal of Physics: Conference Series. Bandung: IOP Publishing, 2019, 1127(1): 012021.
- [21] Guo Z W, Hu L Y, Liu C M, et al. Application of the CSAMT method to Pb-Zn mineral deposits: A case study in Jianshui, China[J]. Minerals, MDPI, 2019, 9(12): 726.
- [22] Di Q Y, Fu C M, An Z G, et al. An application of CSAMT for detecting weak geological structures near the deeply buried long tunnel of the Shijiazhuang-Taiyuan passenger railway line in the Taihang Mountains[J]. Engineering Geology, 2020, 268: 105517.
- [23] 范迪富, 徐宁玲. 苏北盆地中低温地热资源成矿模式研究[J]. 水文地质工程地质, 2015(4): 164-170.
- [24] 邹鹏飞, 邱杨, 范迪富. 苏北盆地典型地区中低温地热流体地球化学特征研究[J]. 高校地质学报, 2022, 28(2): 262-273.
- [25] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809-1816.
- [26] 何继善, 薛国强. 短偏移距电磁探测技术概述[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 1-8.
- [27] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1065-1072.
- [28] 何继善. 广域电磁法理论及应用研究的新进展[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 985-990.
- [29] 曹彦荣, 宋涛, 韩红庆, 等. 用广域电磁法勘查深层地热资源[J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 678-683.
- [30] 柳建新, 郭振威, 郭荣文, 等. CSAMT和重力方法在狮子湖温泉深部地球物理勘查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1868-1873.
- [31] Nabighian M N, Grauch V J S, Hansen R O, et al. The historical development of the magnetic method in exploration[J]. Geophysics, 2005, 70(6): 33ND-61ND.
- [32] 姜德波, 宋国玺, 李楠, 等. 磁法在我国矿产预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 249-256.
- [33] 孙勇军, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 微动勘查方法及其研究进展[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 326-334.
- [34] 何正勤, 丁志峰, 贾辉, 等. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J]. 地球物理学报, 2007(2): 492-498.
- [35] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1841-1845.
- [36] 付微, 徐佩芬, 凌苏群, 等. 微动勘探方法在地热勘查中的应用[J]. 上海国土资源, 2012, 33(3): 71-75.
- [37] 张一梵. 微动勘探法在浅层探测中的研究与应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [38] 董耀, 李光辉, 高鹏举, 等. 微动勘查技术在地热勘探中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1345-1351.
- [39] 陈斌. CSAMT法与微动测深法在漳州某区地热资源勘探中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(1): 64-69.
- [40] Xu P F, Ling S Q, Li C J, et al. Mapping deeply-buried geothermal faults using microtremor array analysis[J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(1): 115-122.
- [41] 甘伏平, 吕勇, 喻立平, 等. 氦气测量与CSAMT联合探测地下地质构造——以滇西路西地区帕连、法帕剖面探测为例[J]. 地质通报, 2012, 31(Z1): 389-395.
- [42] 贾文懿, 唐红, 葛君伟, 等. 氦气测量及其在寻找基岩地下水、地热和工程地质中的应用[J]. 物探与化探, 1987(5): 339-347.
- [43] 王莹, 周训, 于溪, 等. 应用地热温标估算地下热储温度[J]. 现代地质, 2007(4): 605-612.
- [44] 吕金波, 车用太, 王继明, 等. 京北地区热水水文地球化学特征与地热系统的成因模式[J]. 地震地质, 2006(3): 419-429.
- [45] Fournier R O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. Geothermics, 1977, 5(1-4): 41-50.
- [46] 孙占学, 李学礼, 史维浚. 江西中低温热水的同位素水文地球化学[J]. 华东地质学院学报, 1992(3): 243-248.

## Innovation and application of geothermal resources exploration technology in the mid-deep layers of the Yangtze River Delta

ZOU Pengfei<sup>1,2</sup>, XU Xueqiu<sup>1\*</sup>, CHENG Yuanzhi<sup>3</sup>, DU Jianguo<sup>1</sup>, WANG Kuanbiao<sup>1</sup>, XIE Jianlei<sup>4</sup>, MAO Guanhui<sup>5</sup>, GUAN Yu<sup>6</sup>

1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China
2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China
3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
4. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China
5. Zhejiang Hydrogeological Engineering Geological Brigade, Ningbo 315012, China
6. Geological Environment Monitoring Station of Anhui Province, Hefei 230001, China

**Abstract** Driven by the integrated high-quality development of the Yangtze River Delta region and the national strategy of Peak Carbon Dioxide Emissions and Carbon Neutral, generally shortened to Dual Carbon, there is a strong demand for clean energy. The Yangtze River Delta is rich in mid-deep geothermal resources. It is of great significance to study the exploring technology and method of geothermal resources in mid-deep layers in the Yangtze River Delta. Moreover, its innovation and application which will support the low-carbon development of the Yangtze River Delta will promote the exploitation and utilization of geothermal resources in mid-deep layers in this region. Based on the exploration practice of geothermal resources in the Yangtze River Delta region, this paper analyzes and studies the applicable conditions and application effects of the main technical methods of geothermal exploration in different geological structure conditions, geothermal systems and heat storage types, and forms a method system of geothermal resources exploration in the middle and deep depths of the Yangtze River Delta region. The selection of medium and deep geothermal exploration technology and method should be carried out on the basis of fully analyzing the geological background of the exploration area. It is necessary to select appropriate technology and effective combination of methods according to different geothermal geological conditions and different exploration stages to ensure good exploration effect. Gravity and magnetic exploration are suitable for detecting the information of basement, fault structure and magmatic rock distribution in sedimentary basins. We utilize controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) and wide-field electromagnetic method (WFEM) for detecting the location of hidden thermal reservoir and thermal control structure with high accuracy, which is the most effective method to determine the location of geothermal well. The ability of microtremor survey method (MSM) to distinguish geothermal reservoir and cap rock is better than other geophysical exploration methods. Temperature measurements in shallow drillholes and radon gas survey are the most effective means to explore convective geothermal resources in shallow cover area. Different combinations of techniques and methods should be adopted in exploring geothermal resources in different geological structural units. It is advisable to use the combination of CSAMT, WFEM, MSM, gravity and magnetic method to explore deep-buried conduction-type geothermal resources in tectonic uplift area. The combination of CSAMT, temperature measurement and radon measurement should be adopted to explore convective geothermal resources. A combination of CSAMT, large pole distance electric sounding and MSM is used to explore conduction-type pore geothermal resources in sedimentary basins. The combination of CSAMT, MSM, high precision gravity and shallow hole temperature measurement is used to explore the composite geothermal resources in the uplift and depression fault zone. In the area with strong hydrothermal activity, the underground heat storage structure and geothermal anomaly range are determined by analyzing the enrichment law of some special elements in soil and groundwater. The cationic chemical temperature scale and SiO<sub>2</sub> temperature scale in geothermal fluid are used to estimate geothermal reservoir temperature. In general, hydrogen and oxygen stable isotopes are used to study the genesis of geothermal system. Different drilling, well formation and well washing methods should be adopted according to different geothermal reservoir types. Pore type geothermal wells with soft lithology of thermal reservoir generally adopt positive circulation mud drilling, spray well washing, polyphosphate well washing and other

methods, the casing is inserted into the whole hole, and the water intake interval is formed by winding filter water pipe. For fissure geothermal wells with high lithologic hardness of hot reservoir, positive circulation mud drilling is generally adopted, which is suitable for injection well washing, polyphosphate well washing, liquid carbon dioxide well washing, compressed air well washing and other washing methods. Open hole well formation or filter pipe well formation is adopted for water intake interval. For the karst geothermal well whose reservoir lithology is carbonate rock, reverse circulation drilling and positive circulation drilling techniques can be used, and the water intake section can be formed by open hole or filter pipe. Acidizing fracturing is the most effective way to increase the water yield of karst - fissure geothermal well.

**Keywords** the Yangtze River Delta; mid-deep geothermal resources; geophysical prospecting; geochemical prospecting; geothermal well drilling ●



(责任编辑 祝叶华)