

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

杨 林, 姜国庆

(江苏省地质调查研究院)

导读: 勘查区位于工业发达、城镇密集的苏南地区, 场地条件复杂、干扰严重; 第四系和红层覆盖厚度大, 构造裂隙型带状热储埋藏深度超过千米, 地热勘查选靶定位难度极大! 江苏省地质调查研究院研究人员从区域地质、地球物理及物性资料入手, 综合运用重力、磁法、电法、测温、测氦多种地球物理方法, 通过多元物探信息融合, 从热源、通道、储层、盖层四个方面开展地热地质条件研究: **热源:** 区域重力与面积性电测深资料揭示研究区属于隆、凹相间构造, 表明中生代以来上地幔热动力作用强烈, 具备寻找地热资源的有利构造条件; 区内磁法异常平静、单调, 不存在隐伏岩体等附加热源, 地热主要来自地球内部自然增温。 **通道:** 可控源音频大地电磁法资料揭示区内北东向与北西向断裂发育, 其中北西向断裂具有张扭性质, 规模及切割深度大, 伴生浅表地温及放射性氦异常, 是导水、导热的重要通道和控热构造。钻探验证了 CSAMT 推断断裂构造的可靠性。 **储层:** 面积性电测深资料显示区内古生界三叠系青龙组灰岩广泛分布, 成为良好的裂隙-岩溶含水热储层。 **盖层:** 第四系松散层及白垩系浦口组厚度大, 导热率低, 有利于热储层蓄热增温, 为理想的地热盖层。在上述研究的基础上确定了 1 处地热井位置。经钻探验证, 在 1350-1450m、1620 ~ 1720m、1900 ~ 2010m 深度段发现含热水构造裂隙带。钻遇的地层及构造情况与物探推断结果基本吻合, 水量及水温参数均满足设计要求。文中详细介绍了选靶定位过程, 展示了多种物探方法地热异常特征, 为其它地区地热勘查提供了重要参考; 江苏省地质调查研究院近年来不断在中新界厚覆盖区取得地热勘探成果, 对全国类似覆盖区开发地热资源具有很好的示范意义!

0 引言

地热资源作为一种宝贵的清洁能源, 具有其他能源无法比拟的优势, 科学规划、合理利用地热资源对改变能源结构、保护生态环境、促进低碳发展具有重大而深远的意义。苏南地区是江苏省经济最发达的区域、中国首个现代化建设示范区, 也是中国人口、经济和城镇密度最高的区域之一, 能源资源消耗量巨大, 因此, 该地区对以地热资源为代表的清洁能源的开发利用需求更为迫切。根据前人研究, 苏南地区地热资源可以划分为温泉、浅层低温能、中浅层地热水和深成干热岩四大类, 其中, 中浅层地热水资源是江苏地热资源勘查利用的主流, 潜力巨大。本文研究对象正是埋深 200 ~ 3000m 的中浅层构造裂隙型地热资源, 该类型地热资源具有沿断裂构造呈带状分布的显著特点,

并且以构造为地热发育的先决条件, 以碳酸盐岩为最理想的储层, 因此, 选择有效的技术手段从“源、通、储、盖”四个方面查明地热地质条件, 尤其是查明控热构造成为该类型地热资源勘查的核心问题。地球物理方法以其无损、高效、成本低、适用性强等优势, 在地热资源勘查中扮演着越来越重要的角色。目前, 地热资源勘查中应用效果较为理想的地球物理方法主要包括重力、磁法、电法、地震、测温、测氦及微动测试等。同时, 针对地热资源成因复杂、开发深度大、风险程度高及地球物理方法多解性的特点, 综合地球物理方法已经成为地热资源勘查的必然选择和成功利器。本文在对研究区地热地质条件、场地条件、干扰因素等进行研究的基础上确定了包括重力、磁法、电法、测温、测氦在内的地球物理方法组合, 通过综合地球

物理方法对苏南地区中浅层构造裂隙型地热资源进行勘查,开展地热资源评价并确定最佳地热井位 1 处,地热钻探揭露地层与构造与物探推断结果较为吻合,地热井水量、水温等均达到预期效果,充分说明了综合地球物理方法在中浅层构造裂隙型地热资源勘查中的有效性。

1 地质背景

本区大地构造单元属于下扬子台坳南通—苏州陷褶带的溇湖断块,内含三个构造单元,自北向南分别为常州凹陷、湖塘断凸、前黄凹陷,地层属扬子地层区下扬子地层分区常州宣城地层小区。印支、燕山运动形成的一系列北东向褶皱和与之相伴的北东向、北西向断层以及北北东向断裂构成了本区主要地质构造基本格局(图 1)。遥感和物探成果推断与研究区关系密切的区域性断裂主要有两条,一条为近东西向鸣凰断裂,该断裂走向 80°,倾向南,倾角 70°~75°,断层力学性质无直接资料,燕山晚期晚阶段仍以张性为主,属正断层;另一条为北西向牛塘—湖塘南断裂,该断裂倾向南东。研究区处于中国东部沿海高热流地热异常带,根据区域井温测量资料,研究区大地热流值为 62mw/m²(图 2),地温梯度为 21℃/km,地热主要来自地球内部通过自然增温形成的热源。研究区隆凹相间构造与深切断裂关系密切,盆地边缘及内部存在一系列平行于盆地边界的深断裂,是深部热源上导的主要通道,北东、北西向及东西向断裂自燕山运动以来可能长期活动,加强了与深部热源的沟通;三叠系青龙组、二叠系栖霞组及石炭系黄龙、船山组灰岩在长期地质演化过程中经历多次断裂活动、抬升剥蚀和岩溶化作用,成为良好的裂隙-岩溶含水热储层;第四系松散层、白垩系浦口组、二叠系龙潭组具有厚度大、热导率低的特点,有利于热储层蓄热增温,为理想的地热盖层。综合分析可知研究区具备地热储积的“源、通、储、盖”等基本地热地质条件。

根据区域岩石密度资料(表 1),研究区宏观上存在两个密度界面,第一密度界面是第四系与新近系之间的界面;第二个是第四系-白垩系与三叠系及更老地层之间的界面。区内沉积岩地层呈无磁或弱磁特征,磁异常图上出现的局部圈闭异常与具不同磁性的岩浆岩有关。岩矿石电阻率主要

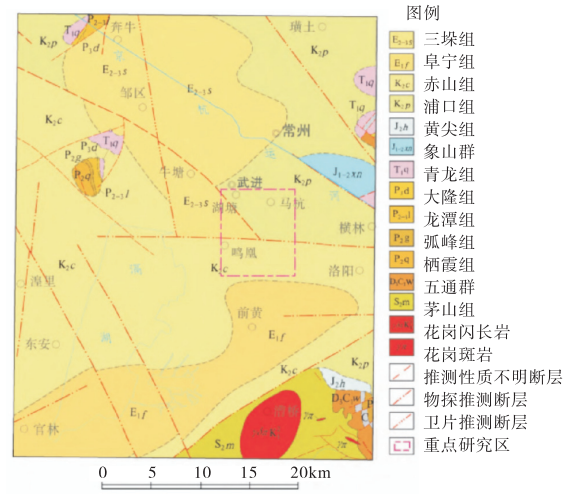


图 1 研究区基岩地质图

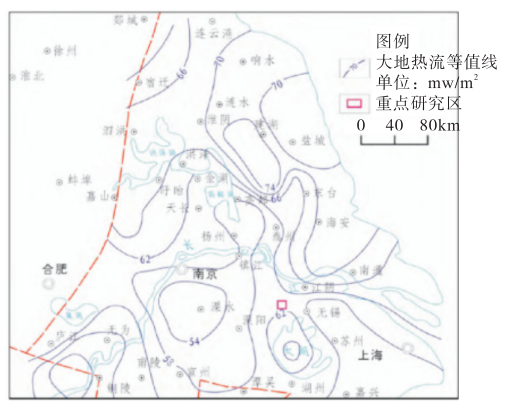


图 2 大地热流等值线图

表 1 区域物性参数统计表

地层 代号	岩石名称	电阻率 ρ / ($\Omega \cdot \text{m}$)	密度 σ / (10^3kg/m^3)	磁化率 κ / (10^{-5}SI)
Q	黏土、泥质粉 细砂	10 ~ 15	1.93	57.8
	砂、砂砾	40 ~ 60		
	泥岩、粉砂质	10 ~ 20		
N	泥岩		2.28	
	细砂岩、砂砾岩	20 ~ 30		
K	粉细砂岩	7 ~ 20	2.43	
	砂砾岩	25 ~ 50	2.67	
T _{1q}	灰岩	200 ~ 400	2.68	22.5
P _{2-3l}	页岩、砂页岩	15 ~ 60	2.56	15
P _{2q}	灰岩	500 ~ 600	2.69	19.1
C _{2h}	灰岩	500 ~ 800	2.7	40.2

取决于其孔隙度、裂隙度及其所含水分,第四系黏土层及白垩系粉细砂岩地层电阻率最低;中生界以前层位的砂岩、泥岩的电阻率介于白垩系粉细砂岩与灰岩地层之间,属中等电阻率层;灰岩尤其

是微晶灰岩电阻率最高,在区内构成高阻标志层,反映在电阻率测深曲线的尾枝常呈 45°斜率上升,是寻找地热储层的主要标志。

2 数据与方法

在充分研究地质资料的基础上明确了以隆凹相间构造为勘查靶区、以第四系和白垩系为盖层、以三叠系青龙组灰岩为地热储层、以灰岩中断裂破碎带为导水构造的地热勘查目标;确定了以重力、磁法、直流电测深、可控源音频大地电磁法、地温测量和氦气测量为主的综合地球物理勘探方法。技术路线如下:首先,利用区域重力、航磁和面积性直流电测深进行构造分区、确定基底起伏及岩浆岩体的分布,排除钻遇火成岩风险,确定勘查靶区;其次,在勘查靶区运用可控源音频大地电磁测深查明深部地层结构、热储埋深及断裂构造位置;再次,在上述勘查有利位置利用地温测量圈定地热异常区、氦气测量确定浅埋藏断裂;最后,综合分析勘探成果确定最佳地热孔位。

2.1 重力与磁法测量

重力异常与地热系统存在较好的相关性,基底隆起和凹陷表现为局部重力高、低,作为热源的壳内熔融岩浆房表现为重力低,作为导水通道的断裂构造或破碎带表现为重力异常梯度带,因此,重力勘探可用于研究热储区基底起伏及区域性断裂构造分布特征、确定热源分布等(金永念和季克其,2001;雷晓东等,2017)。磁法勘探主要用于确定岩浆岩体的分布及圈定热蚀变带等(李建军等,2006)。本文重力方法采用重力法采用 1:20 万重力数据,磁法采用 1:5 万航磁数据,资料处理解译在 GDPS(物探数据分析系统)平台上进行,通过对场的变换和分离突出线性构造和局部构造。

2.2 电法测量

电法勘探主要用于查明地层结构、热储埋深、与热通道有关的断裂构造、热异常等。研究区电法工作程度较高,直流电测深测点覆盖全区,本文面积性直流电测深工作基于收集的多份勘查资料中 1:1 万、1:5 万及 1:10 万电测深数据,主要进行数据整理、汇总、曲线类型划分、定性定量分析等。可控源音频大地电磁法(CSAMT)具有施工效率高、探测深度大、横、纵向分辨率高、抗干扰能力强、立体观测等优势,在中浅层地热勘查中具

有较好的应用效果。本文在区域重、磁、电解译有利靶区布置 CSAMT 测线 7 条,如图 3 所示。数据采集使用美国 Zonge 公司生产的 GDP52II 多功能电法仪,赤道偶极装置标量测量方式,每 7 个点共用 1 个磁场值,工作频率 $f=0.125\sim 8192\text{Hz}$,接收点距 50m,数据反演采用 SCS2 D 二维圆滑模型反演软件,以阻抗电阻率和阻抗相位联合反演电阻率参数。



图3 综合物探工作布置图

2.3 地温与氦气测量

地温是地热源的直接显示和标志,是寻找地热源、圈定地热异常的重要依据,并且地温异常的分布往往与新构造断裂分布具有一定相关性,可以为寻找热水上涌通道指明方向。放射性元素氦沿断裂破碎带向地表迁移,在地表土壤中富集形成氦浓度异常,通过土壤测氦可以达到寻找浅埋藏活动断裂的目的。本文地温测量与氦气测量同步同点,测网一致,主要布置在前期勘查得到的异常中心区域,测网布设如图 3 所示。浅表地温测量采用分辨率为 0.1t 的分体式热敏电阻测温仪,测温深度 1.5m,测量点距 50m。氦气测量采用 FD-5017 RaA 土壤专用测氦仪,测量深度 0.7m,极限探测灵敏度小于 $3.7\times 10^2\text{Bq/m}^3$ 。

3 结果分析

3.1 区域重、磁、电划分构造单元

根据区域重、磁、电特征,研究区可以划分为

3 个地球物理异常区,自北向南分别为常州低重、低阻、杂乱磁场区,马杭高重、高阻、变化磁场区及前黄低重、低阻、相对弱磁异常区。推断上述地球物理异常区分别与大地构造上常州凹陷、湖塘断凸、前黄凹陷 3 个构造单元相对应。

对比图 4 布格重力异常图和图 5 视电阻率平面等值线图可以看出研究区重力与电法具有很好的对应关系,重力高带是电法的高阻带,重力低带为电法的低阻带,重力等值线密集带往往也是电阻率等值线的密集带,究其原因三叠系青龙组灰岩顶界面既是区内重要的电性界面也是重要的密度界面,因此,重力异常与电阻率异常呈现很好的正相关。

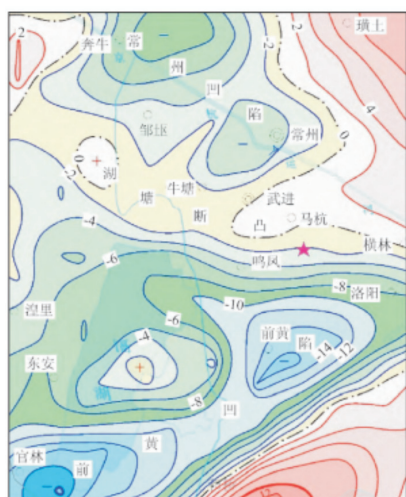


图 4 研究区布格重力异常图(单位: $\times 10^{-5} \text{m/s}^2$)

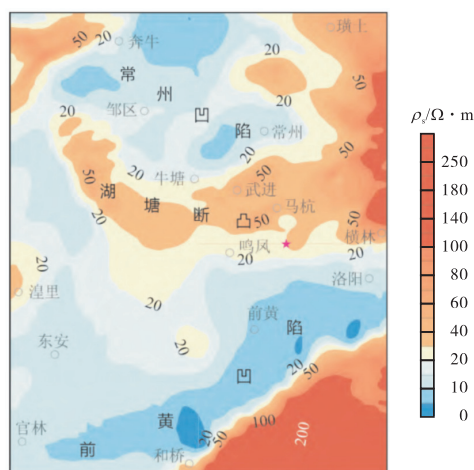


图 5 研究区 $AB/2 = 1500\text{m}$ 视电阻率平面等值线图

研究区内面积性电测深曲线类型具有明显的

分区性,并且在凹陷与隆起区表现出显著的差异。凹陷区多出现层次较多的曲线,以 KQH 型曲线最为常见,一般尾部有 QH 的共同点,是中新生代地层在凹陷区内的反映。常州凹陷区曲线类型多为 KQH 和 HKQH 型,电测深推断凹陷内中新生界沉积厚度 700-1700m;前黄凹陷曲线类型多为 KQH 和 KQ 型,KQH 型五层曲线第五层推断为三叠系青龙灰岩及更老地层,而 KQ 型四层曲线是由于低阻层厚度增大,高阻层尚未反映,电测深推断凹陷内中新生界最大厚度在 2000m 以上。湖塘断凸曲线类型多为 KH、KHA 型,反映低阻层厚度较薄,高阻层埋藏浅,即为青龙组灰岩及更老地层隆起区。区域上隆凹相间构造是中生代以来上地幔热动力作用的结果,是寻找地热资源的有利构造条件。根据区域重、磁、电资料综合分析选定勘查靶区如图 4 和图 5 中五角星所示,勘查靶区位于湖塘断凸,总体处于湖塘断凸与前黄凹陷结合部,具备良好的构造、储层、盖层条件,并且根据航磁资料勘查靶区处于航磁异常平静、单调区,推断靶区没有火成岩分布,可以排除钻遇火成岩体的风险,下一步的勘查工作主要针对勘查靶区展开。

3.2 CSAMT 确定地层结构及断裂构造

如图 6 为研究区 CSAMT 反演电阻率断面图三维立体图,其中,图 6a 为东西向断面,图 6b 为南北向断面。通过三维空间对比可以看出,横向上研究区内各断面之间连续性较好,纵向上电性结构相对简单。本文从地层和构造两个方面进行解释分析。

地层:各断面由浅到深地层电阻率均呈逐渐升高的趋势,总体上可以分为三个电性层,第一电性层深度自地表至 150m 左右,电阻率 $10 \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$,推断为第四系(Q),岩性以黏土、粉细砂为主;第二电性层深度 150 ~ 500m 左右,电阻率 $20 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$,推断为白垩系浦口组(K_2P),岩性以粉砂岩、砂岩、砾岩为主,基岩面由北向南呈缓慢加深的趋势,与区域构造特征一致;第三电性层深度在 500m 以下,电阻率 $100 \sim 1000 \Omega \cdot \text{m}$,推断为三叠系青龙组 T_1q ,岩性以灰岩为主,为研究区主要地热储层。

构造:CSAMT 电阻率等值线断面图横向上出

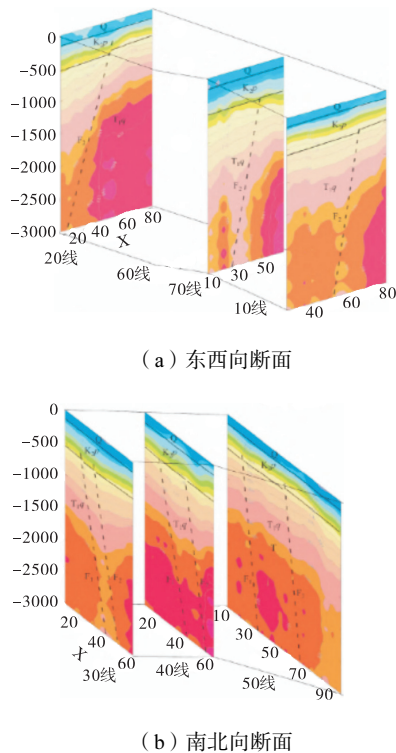


图 6 研究区 CSAMT 反演电阻率及地质解释立体图

现电阻率突变或纵向上见陡立的低阻异常一般是判断断裂构造存在的重要标志。由图可以看出,研究区内除 60 线外,其余测线断面图上均存在电阻率等值线横向突变带,具体表现为近于直立的低阻异常或串珠状低阻异常,具有断层破碎带的异常特征,推断上述异常位置存在断裂构造。通过空间对比,将断面图上推断的断裂构造确定为两组,分别命名 F1 和 F2,其中 F1 断裂走向北东,倾向南东,以压性为主,由南北向测线控制,断裂规模相对较小;F2 断裂走向北西,倾向南西,以正断层为主,性质为张扭性,由东西与南北向测线共同控制,断裂规模及切割深度均较大。

3.3 地温测量圈定地热异常区

根据浅表地温测量结果,研究区地温变化范围为 $8.8 \sim 14.2^{\circ}\text{C}$,平均 12.1°C ,从测温点记录分析,研究区温度分布与岩性无明显相关性,可显示浅表地温异常的分布。如图 7 为研究区浅表地温等值线图,由图可以看出研究区东南部和西北部分别存在一处地温高值异常,两处异常区中心点连线呈北西方向,中心点连线的走向及位置与 CSAMT 法推断 F2 断裂大致吻合,推断地温异常与 F2 断裂呈一定的关联性。

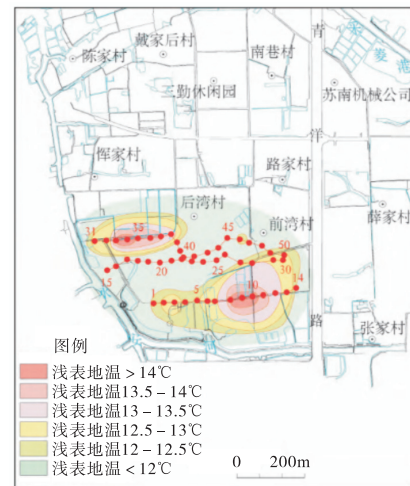


图 7 研究区浅表地温等值线图

3.4 氡气测量查明浅埋藏断裂

根据放射性氡气测量结果,研究区放射性氡气变化范围为 $3 \sim 574\text{Bq}/\text{m}^3 \times 100$,平均 $65.92\text{Bq}/\text{m}^3 \times 100$ 。如图 8 为研究区氡含量等值线图,由图可以看出研究区放射性氡含量呈现明显的分区性,大于 $65.92\text{Bq}/\text{m}^3 \times 100$ 的异常与地温异常基本吻合,地温异常与放射性氡含量异常呈正相关关系,并且地温异常与氡含量异常的分布明显受到北西向 F2 断裂控制,从而一方面佐证了 F2 断裂的存在,另一方面表明 F2 断裂既是地下热水运移的通道又是放射性氡向地表迁移的通道。

4 综合研究

研究区地热资源为中浅层构造裂隙型,该类型地热资源的发育严格受断裂构造尤其是张性断裂的控制,因此,寻找与热通道有关的深大断裂是地热勘查工作的关键。综合地球物理勘探成果表明研究区内存在两组断裂构造,即北东向断裂片和北西向断裂 F2(图 8),其中 F2 断裂为张性断裂,属最新的一组断裂,古近纪以来具有一定的活动性,并且 F2 断裂伴生浅表地温及放射性氡异常,因此,综合研究认为 F2 断裂可能为沟通深部热源的通道,具备与热通道有关的深大断裂的条件,因此,地热井应针对 F2 断裂进行布置。综合研究确定的最佳地热井位如图 9 中 RSQ1 所示,该孔位于可控源音频大地电磁法 10 线 60 桩号附近,反演电阻率断面图上该位置断层破碎带串珠状低阻异常明显,并且平面上接近浅表测温与土

壤氦浓度异常中心。

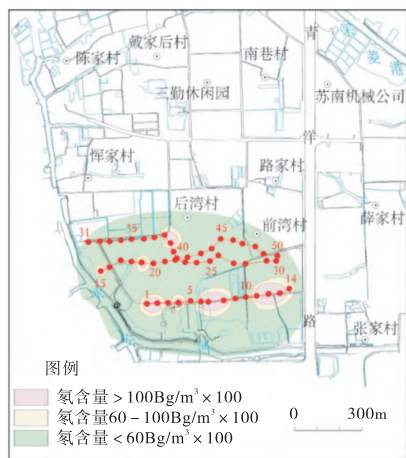


图9 研究区综合地球物理勘探成果图

5 结果讨论

根据综合地球物理勘查成果确定的 RSQ1 地热井揭露地层结构、测井视电阻率、井温及 CSAMT 反演电阻率断面综合对比见图 10。通过对比可以看出 RSQ1 孔揭露地层由浅到深依次为第四系(Q)、白垩系浦口组(K_{2p})和三叠系青龙组(T_{1q})，揭露地层结构与地球物理方法推断结果一致，界面深度略有差异。根据泥浆漏失情况及测井资料可知 RSQ1 井 1350-1450m、1620~1720m、1900~2010m 深度段构造裂隙较为发育，为主要出水段，通过对比可以看出上述三处构造裂隙发育段与 CSAMT 推断 F2 断裂位置相对应，从而充分验证了 CSAMT 推断断裂构造的可靠性。抽水试验结果表明，RSQ1 井最大出水量为 357.1m³/d，满足设计要求。根据测温资料，RSQ1 井内温度与深度近似呈线性变化关系，1800m 深度测量温度为 52.4℃，水温亦达到预期效果。

6 结 论

(1) 基于综合地球物理方法，通过多元信息融

合，查明了区内基底起伏、地层结构、热储埋深、隐伏断裂及岩浆岩体分布等。重力及面积性电深资料表明研究区基底为隆、凹相间构造，自北向南依次为常州凹陷、湖塘断凸和前黄凹陷，凹陷区与隆起区中新界沉积厚度差异明显，具备寻找地热资源的有利构造条件。可控源音频大地电磁法推断地层由浅到深依次为第四系(Q)、白垩系浦口组(K_{2p})和三叠系青龙组(T_{1g})，推断断裂两组即北东向 F₁ 与北西向 F₂，其中，北西向 F₂ 断裂伴生浅表地温及放射性氦异常。磁法资料表明区内没有火成岩分布，排除钻遇火成岩风险。

(2) 通过“源、通、储、盖”四要素综合分析，认定研究区具备良好的地热地质条件。研究区总体上属于正常地温区，热源主要来自地球内部自然增温，大气降水在补给区沿断裂破碎带向下渗透到一定深度，不断吸收围岩热量成为热水。区内北西向与北东向断裂发育，其中，北西向断裂具有张扭性质，断裂规模及切割深度大，古近纪以来具有一定的活动性，成为主要的导水、导热通道，控制着区内地热资源的分布。区内地热储层为三叠系青龙组(T_{1q})灰岩，而热导率低的第四系(Q)松散层和白垩系浦口组(K_{2p})为理想的地热盖层。

(3) 综合研究的基础上确定地热开发井 1 处(RSQ1)，设计 RSQ1 井垂向上穿过北西向 F₂ 断裂破碎带，平面上接近浅表测温与土壤氦浓度异常中心。经钻探验证，RSQ1 井钻遇地层及构造情况与物探推断结果基本吻合，水量及水温参数均满足设计要求，一方面说明苏南地区中浅层构造裂隙型地热资源条件良好，潜力巨大；另一方面说明综合地球物理方法应用于苏南地区地热资源勘查是行之有效的，对类似地热资源勘查工程具有很好的借鉴意义。

转自《地球物理学进展》