

宁海县深叻镇地热流体富集规律、控热断裂特征及开发潜力研究

陈书阁

(中国煤炭地质总局水文地质局, 河北 邯郸 056000)

摘要: 本文以宁海县深叻镇地热田为研究区域,旨在揭示断裂构造对地热流体的控制机制及富集规律。通过野外地质调查、地球物理探测与地球化学分析,系统研究了NE向与NW向断裂的几何学特征、活动性及其控热作用。结果表明,断裂交汇区形成高渗透性裂隙网络,主导热流体垂向深循环(2000~3000m)与浅部富集,热储层温度达40~62℃,氟、硅等微量元素显著富集。构建了“深循环加热-断裂交汇富集-封闭性调控”三位一体的断裂控热型地热系统模型,评估总热储资源量为 1.2×10^{18} J,优先开发区(F1断裂西侧)具备温泉疗养与低碳供暖开发潜力。研究成果为地热资源科学开发与生态保护提供理论支撑。

关键词: 地热流体;富集规律;控热断裂;热储特征

中图分类号: P314.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)06-0066-9

0 引言

地热资源作为清洁可再生能源,在全球能源结构转型中具有重要战略地位^[1]。宁海县深叻镇地处浙东沿海中生代火山活动带,其独特的地质构造背景为地热流体的形成与富集提供了优越条件。然而,长期以来,该区域地热资源开发面临热储分布规律不明、控热断裂机制不清等问题,制约了资源的高效开发与可持续利用。本文以深叻镇地热资源为研究对象,通过野外地质调查、地球物理探测及地球化学分析等手段,系统研究断裂构造对地热流体的控制作用,揭示地热流体的富集规律,构建断裂控热型地热系统模型。研究成果不仅为深叻镇地热资源的科学开发提供理论支撑,也为同类构造背景区的地热勘查与开发提供参考。

1 研究区地质背景与地热资源概况

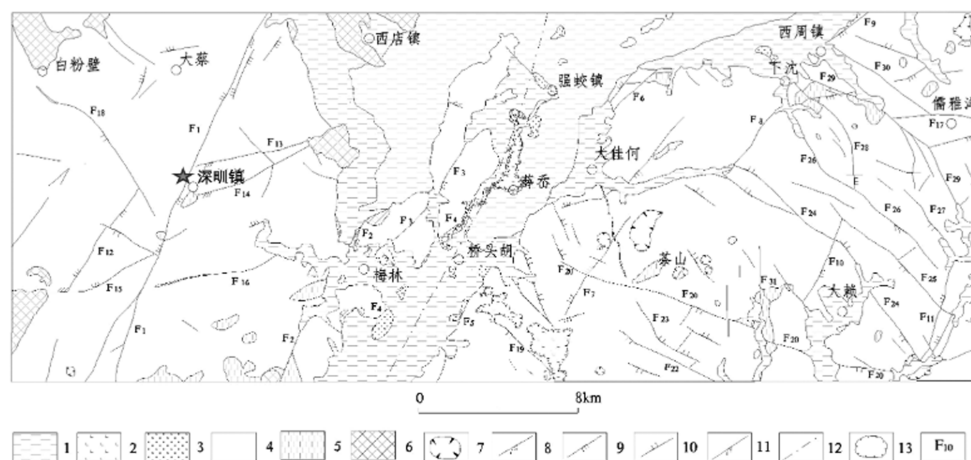
1.1 区域地质构造特征

深叻镇地处浙东沿海中生代火山活动带核心区域,位于华南褶皱带与东南沿海岩浆岩带的交汇部位,隶属于丽水-宁波断裂带东段。区域

构造演化受太平洋板块与欧亚板块长期俯冲作用控制,经历多期次构造运动,形成以断裂构造为主体的复杂地质格局。研究区处于天台-四明山断隆与三门湾拗陷的过渡带,基底由中生代火山岩系和侵入岩构成,盖层发育新生代松散沉积层,为地热系统的形成提供了基础条件^[2]。

研究区断裂构造以NE向和NW向两组断裂为主,构成“棋盘格”式构造格局。NE向断裂为区域主干断裂,如深叻断裂、温泉断裂等,呈25°~40°延伸,倾向NW或SE,倾角60°~85°,断裂带宽数十米至数百米,具压扭性特征,控制了地热流体的主要运移通道。NW向断裂多为次级断裂,呈310°~330°展布,规模较小但切割NE向断裂,在交汇部位形成局部应力集中区,为地热流体的富集提供了有利构造条件,尤其在镇区附近形成显著的地热异常区。

深叻镇基底由中生代酸性火山岩(流纹岩、凝灰岩)和燕山期侵入岩(花岗岩、花岗闪长岩)构成。岩浆活动形成的高热导率岩体为地热系统提供了稳定热源,而火山岩与侵入岩接触带发育的构造破碎带,显著增强了热流体的循环与富集能力。盖层以第四系冲积层、残坡积层为主,



1—第四系;2—新近系;3—水康群;4—磨石山群;5—潜水山岩;6—侵入岩;7—火山通道;8—压扭性断裂;9—压性断裂;
10—张性断裂;11—张扭性断裂;12—区域性断裂;13—不整合;14—断裂编号

图1 宁海县深叻镇构造纲要图

厚度 5~20m,对热储层起到重要的保温作用,与基底共同构成完整的地热储集系统。宁海县深叻镇构造纲要图如图 1 所示。

1.2 地热流体赋存条件

1.2.1 地热类型

研究区地热系统属于低温对流型断裂控热地热系统,热流体以大气降水为主要补给源,沿 NE 向断裂深循环至 2000~3000m 深度,受燕山期岩浆余热加热后,通过断裂交汇区裂隙网络向上运移富集,形成温度 40~62℃ 的热储层。该类型地热系统的显著特征是热储分布严格受断裂构造控制,储集空间以断裂破碎带、蚀变带及接触带裂隙为主,具有“深循环加热—断裂控导—构造富集”的成因机制。

1.2.2 地层岩性组合特征

深叻镇地层以中生代酸性火山岩(流纹岩、凝灰岩)和燕山期侵入岩(花岗岩、花岗闪长岩)为主,局部发育新生代松散沉积层。火山岩与侵入岩接触带因构造破碎形成高渗透性储集层,为热流体运移提供通道;盖层为第四系冲积层、残坡积层厚度较薄(5~20m),透水性差,兼具保温与封闭作用,形成相对独立的热储系统^[3]。

1.2.3 水文地质条件

研究区地下水类型以基岩裂隙水为主,受 NE 向断裂控制形成热储含水层。断裂破碎带及

火山岩—侵入岩接触带渗透性良好,构成主要含水介质;盖层黏土及致密火山岩构成隔水层,抑制热流体散失。热流体补给来源以大气降水为主,沿断裂带深循环至地壳浅部,受燕山期岩浆余热加热后形成地热系统。

1.2.4 地热流体化学特征

地热流体以 $\text{HCO}_3^- \text{Na}^+$ 型为主,矿化度较低 (<1g/L),水温介于 40~60℃,富含 SiO_2 、Li、B 等微量元素。氢氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^2\text{H}$ 值显示其为大气降水成因,碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 特征表明热流体与围岩发生了溶滤作用,反映其深部循环路径及与岩浆活动的关联性。

2 控热断裂构造特征及其控热机制

2.1 断裂构造几何学特征

深叻镇断裂构造以 NE 向和 NW 向两组断裂为主,形成“棋盘格”式构造格局。NE 向断裂(如深叻断裂、温泉断裂)为区域主干断裂,延伸长度达数公里至数十公里,走向 $25^\circ \sim 40^\circ$,倾向 NW 或 SE,倾角 $60^\circ \sim 85^\circ$,断裂带宽数十米至数百米,是地热流体运移的主要通道。NW 向断裂多为次级断裂,规模较小(延伸数百米至数公里),走向 $310^\circ \sim 330^\circ$,倾角较陡($70^\circ \sim 85^\circ$),与 NE 向断裂共轭交叉,形成网络状构造体系,显著增强了断裂带的渗透性和控热能力。

断裂带内部具显著分带性:核部为破碎带,由角砾岩、碎裂岩及断层泥组成,宽度数米至数十米,透水性强,是热流体垂向运移的主通道;其两侧发育蚀变带,受构造热液作用影响^[4],岩石发生硅化、绢云母化和绿泥石化,渗透性降低但具备储集能力;外围为影响带,受构造应力作用形成密集裂隙区,渗透性较围岩显著增强,成为热流体侧向扩散的有利区域。这种“破碎带-蚀变带-影响带”的层状结构,赋予断裂带导水与储水的双重功能。

断裂带自中心向外呈现“三带”分异特征:核心破碎带以压扭性构造岩为主,孔隙度高,主导热流体的集中运移;过渡蚀变带因矿物蚀变弱化岩石力学强度,兼具导水与储水功能;外围裂隙带以张性裂隙为主,渗透性随距离增加递减,形成热流体扩散路径。NE 向与 NW 向断裂交汇部位(如深町镇区)因应力集中、破碎带叠加及裂隙网络密集,形成高热异常区,成为地热田的主要赋存空间。这种分带性特征为地热流体的富集提供了构造-岩性耦合的有利条件。

2.2 断裂构造活动性分析

深町镇断裂构造经历多期构造运动叠加:燕山早期(侏罗纪—白垩纪)受太平洋板块俯冲影响,NE 向断裂以压性逆冲为主,控制火山岩与侵入岩分布;燕山晚期转为拉张应力环境,NW 向次级断裂发育,与 NE 向断裂形成共轭剪切系统,增强热流体循环通道;喜马拉雅期构造趋于稳定,但断裂间歇性活动持续调整局部应力,推动现代地热系统形成^[5]。

区域应力场早期为 NW-SE 向挤压,形成 NE 向压扭性断裂,晚期转为 NNW-SSE 向拉张,诱发 NW 向次级断裂,构成“X”型共轭剪切体系,主导热流体运移方向。断裂交汇部位(如深町镇区)因应力叠加形成高渗透带,成为地热富集核心区。应力场演化通过断裂网络的几何重组,显著控制热储空间分布与流体动力学过程^[6]。

研究区微震活动(震源深度<10km)、沿 NE 向断裂分布的温泉群(水温 40~60℃)及断层

崖、水系错断等地貌证据,揭示断裂带持续活动性。地温梯度异常(5~8℃/100 m)与热流体上涌直接关联,印证断裂活动为地热系统提供动力^[7]。这些现象共同表明,深町镇断裂带仍是热流体循环的活跃通道,支撑地热资源的动态补给与富集。

2.3 断裂控热作用机制

断裂带通过其内部高渗透性破碎带(如角砾岩、碎裂岩)构成热流体的垂向运移主通道。NE 向压扭性断裂(如 F1 断裂)因多期活动形成宽大破碎带,透水性显著增强,驱动深部热流体沿断裂带向上运移^[8];张性断裂(如 NW 向次级断裂)则通过密集裂隙网络提供侧向扩散路径。断裂带的渗透性差异直接控制热流体的流速与流量,成为连接深部热源与浅层储集空间的关键纽带。

NE 向与 NW 向断裂交汇区(如深町镇区)因构造应力集中,破碎带叠加形成高渗透性裂隙网络,显著增强热流体的储集与运移能力。此类区域岩石破碎程度高、裂隙连通性好,为热流体提供扩容空间,同时降低流体运移阻力,导致地热异常集中(如大庄村井、裸心泉井的高出水量与温度)。断裂交汇形成的“构造节点”是地热田的核心赋存部位。

断裂带的封闭性由内部充填物质(如断层泥、蚀变矿物)决定,直接影响热储层的保存条件。开启型断裂(破碎带未胶结)利于热流体持续循环与热量交换,但可能导致热能散失;封闭型断裂(硅化、绢云母化强烈)则形成隔热屏障,阻止热流体逸散,促进高温热储层发育。深町镇 F1 断裂核部以压扭性破碎带为主,兼具导水与局部封闭性,为地热系统提供动态平衡条件。

断裂带的通道效应、交汇富集效应与封闭性特征共同构成地热系统的控热机制。深部热流体沿断裂垂向运移,在交汇区富集形成热储,封闭性断裂则调节热能的保存与释放。这种“运移-富集-保存”三位一体的模式,揭示了深町镇地热田的成因本质,为靶区优选与资源开发提供理论依据^[9-11]。

3 地热流体富集规律研究

3.1 地热流体分布特征

研究区地温梯度为 $8 \sim 12^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 显著高于区域背景值的 $5 \sim 6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 这与断裂构造活动密切相关, 研究区地热井位置分布如图 2 所示。NE 向 F1 断裂及其次级断裂交汇区(如大庄村、裸心泉一带)形成局部热异常中心, 地热井出水温度达 $40 \sim 62^{\circ}\text{C}$, 如表 1 所示。热流体温度空间分异受断裂渗透性控制; F1 断裂西侧因破碎带宽大、裂隙发育, 热流体垂向运移效率高, 井口温度普遍高于东侧(如 DR2 井 62°C vs. DR1 井 35°C)。地温场与断裂交汇部位高度耦合, 表明断裂网络是热能传输的主控通道^[12]。

地热流体以 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ 型为主, 矿化度较低 ($585 \sim 851\text{mg/L}$), pH 值 $7.88 \sim 8.22$ 。氟离子 ($10.7 \sim 18.2\text{mg/L}$) 与偏硅酸 ($41.7 \sim 58.0\text{mg/L}$) 含量显著富集, 其空间分布与断裂带岩性密切相关; F1 断裂西侧火山岩(凝灰岩)与次火山岩接触带因硅化、绢云母化强烈, 热流体中 SiO_2 含量达 $50 \sim 58\text{mg/L}$; 而东侧断裂带蚀变较弱, 氟离子浓度略低 ($10.7 \sim 12.7\text{mg/L}$)。化学场分带性揭示了热流体在运移过程中与围岩的溶滤作用差异。

氢氧同位素 ($\delta^2\text{H}: -65\text{‰} \sim -58\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}: -9.2\text{‰} \sim -8.5\text{‰}$) 表明地热水为大气降水补给, 补给高程约 $800 \sim 1000\text{m}$, 循环深度达 $2000 \sim 3000\text{m}$ 。碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}: -5.2\text{‰} \sim -3.8\text{‰}$) 特征显示热流体与火山岩围岩发生强烈溶滤作用, 岩浆余热为其提供热源。同位素数据印证热流体沿断裂带深循环加热后上涌的成因模式, 循环路径受 NE 向断裂主导, NW 向断裂则控制浅部扩散与富集。

地热流体的温度场、化学场及同位素特征共同揭示其分布受断裂构造-岩性耦合控制。NE 向断裂交汇区为高温、高矿化度热流体的核心赋存区, 而断裂带蚀变程度与围岩地球化学特征决定了化学组分的空间分异^[13]。同位素示踪进一步验证了深循环加热机制, 为断裂控热型地热系

统的定量评价提供了关键依据。

3.2 热储层特征分析

研究区热储层以中生代火山岩(凝灰岩、流纹岩)和燕山期侵入岩(次流纹斑岩)为主, 断裂破碎带及火山岩-侵入岩接触带构成高渗透性储集空间。NE 向 F1 断裂核部破碎带(角砾岩、碎裂岩)渗透率最高 ($0.1 \sim 1.2\text{m/d}$), 是热流体垂向运移的主通道; 蚀变带(硅化、绢云母化)渗透性降低 ($0.01 \sim 0.1\text{m/d}$), 兼具储水功能。

热储层厚度受断裂控制差异显著, F1 断裂西侧(如大庄村井)储层厚度达 $500 \sim 800\text{m}$, 埋深 $450 \sim 1900\text{m}$; 东侧(如 DR1 井)厚度减至 $200 \sim 400\text{m}$, 埋深 $484 \sim 1622\text{m}$ 。地热井出水段集中于 $1500 \sim 2000\text{m}$ 深度(表 1), 反映热储层垂向分布与断裂活动密切相关。

热储层温度 $40 \sim 62^{\circ}\text{C}$, 压力梯度 $1.5 \sim 2.5\text{MPa/km}$, 属低温开放型地热系统。F1 断裂交汇区(如裸心泉井)因深循环加热作用, 温度达 57°C , 显著高于外围区域。温压条件与断裂渗透性、循环深度 ($2000 \sim 3000\text{m}$) 及岩浆余热输入直接相关^[14]。

热储层特征受断裂构造-岩性耦合控制, 高渗透性破碎带主导流体运移, 厚度与温度分异反映断裂活动强度差异, 为靶区优选提供关键依据。

3.3 富集模式构建

3.3.1 断裂控热型地热系统模型

研究区地热系统以“断裂控热型”为核心, 包含三大机制: 首先, 深循环加热机制主导热流体形成, 大气降水沿 NE 向 F1 断裂垂向深循环至 $2000 \sim 3000\text{m}$ 深度, 受燕山期岩浆余热(地温梯度 $5 \sim 8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) 加热后形成高温热流体 ($40 \sim 62^{\circ}\text{C}$); 其次, 断裂交汇富集效应显著, NE 向与 NW 向断裂交汇区(如深叻镇区)因裂隙网络密集(渗透率 $0.1 \sim 1.2\text{m/d}$), 热流体运移阻力降低, 形成地热异常中心(井口温度达 62°C); 最后, 封闭性调控通过断裂蚀变带(硅化、绢云母化)减少热能散失, 维持高温储层稳定发育。

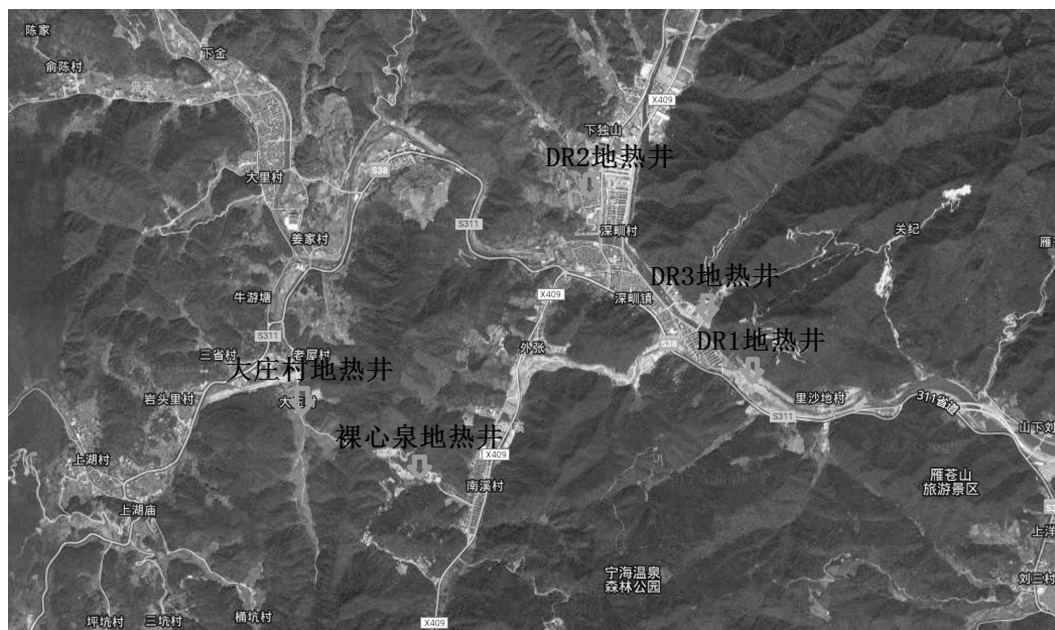


图 2 地热井位置分布图

表 1 该区域各地热井基本情况统计表

地热井编号	实际井深 (m)	出水段位置及岩性 (m)	控制的可开采量 (m ³ /d)/降深 (m)	单位涌水量 (m ³ /d.m)	水温 (°C)
DR2 地热井	2073.41	1728.58-1758.33; 1860.83-1908.83 凝灰岩	902.36/81	11.141	62
大庄村 地热井	1866.02	450.35-579.65; 732.15-745.55; 1435.15-1572.10 凝灰岩,砂岩	542.40/202.48	2.678	52
裸心泉 地热井	2060	1655.75-1661.20; 1754.40-1760.85; 1764.65-1767.70; 1894.45-1901.10; 1953.30-1959.75 砂岩,花岗岩,凝灰岩	1720.22/31	55.469	57
DR1 地热井	1622	484.00-489.00; 894.50-899.75; 1084.00-1085.00; 1408.00-1409.50; 1578.75-1580.25 流纹岩,凝灰岩,砂岩	542.4/192.41	2.819	35
DR3 地热井	2400.25	350-450; 1813.65-1815.00 凝灰岩,砂岩	312.77/166.92	1.874	42

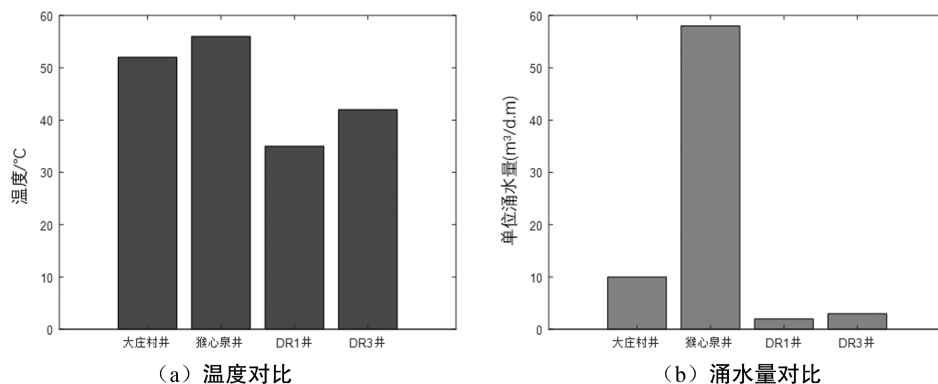


图3 不同构造部位地热参数对比

3.3.2 不同构造部位的富集差异

F1 断裂西侧与东侧地热参数差异显著(如图3):西侧(大庄村井、猴心泉井)破碎带宽大(>50m),裂隙连通性好,热流体垂向运移效率高,井口温度(52~62°C)及单位涌水量(11.14~55.47m³/d.m)均显著优于东侧;而东侧(DR1井、DR3井)因次级断裂(F13、F14)发育弱,裂隙密度低,热流体循环受阻,井口温度(35~42°C)及涌水量(1.87~2.82m³/d.m)明显偏低。此差异反映断裂活动强度对热储性能的直接影响。

3.3.3 深部循环与浅部出露的关系

氢氧同位素($\delta^2\text{H}$: -65‰~-58‰)表明热流体源自大气降水,循环深度2000~3000m,受NE向断裂主导垂向运移;碳同位素($\delta^{13}\text{C}$: -5.2‰~-3.8‰)显示深部热流体与火山岩发生溶滤作用,富集SiO₂(50~58mg/L)、F⁻(10.7~18.2mg/

L)等组分,检测结果如表2所示。

浅部出露则受NW向断裂控制,热流体沿裂隙网络扩散至地表,形成温泉群(水温40~60°C)。这一过程揭示深循环加热与浅部断裂导流的协同作用机制。不同循环深度对应的温度数值如图4所示。

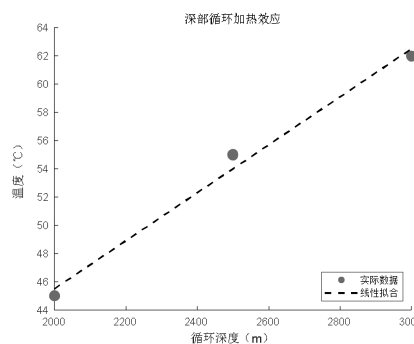


图4 深部循环加热效应

表2 检测结果表

项目	数值/范围	单位
主要离子浓度		
K ⁻	2.58	mg/L
Na ⁻	158	mg/L
Ca ²⁺	9.50	mg/L
Mg ²⁺	0.170	mg/L
HCO ₃ ⁻	292	mg/L
SO ₄ ²⁻	51.3	mg/L
Cl ⁻	9.30	mg/L
F ⁻	14.3(检测值);10.7~18.2(范围)	mg/L
其他关键参数		

续表

项目	数值/范围	单位
溶解性总固体	585	mg/L
偏硅酸(SiO ₂)	55.0(检测值);50~58(范围)	mg/L
总硬度(以CaCO ₃ 计)	24.4	mg/L
化学耗氧量	0.78	mg/L
pH值	8.22	无
重金属及微量元素		
铅(Pb)	<0.001	mg/L
汞(Hg)	0.0034	mg/L
砷(As)	<0.004	mg/L
钡(Ba)	0.003	mg/L
同位素特征		
δ ² H(氢氧同位素)	-65‰~-58‰	‰
δ ¹³ C(碳同位素)	-5.2‰~-3.8‰	‰
水文地球化学特征		
循环深度	2000~3000	m
主导运移构造	NE向断裂	无

注:样品原号:地热水;检测编号:YFH18-179-01;项目名称:宁海县深叻镇裸心泉地热井;报告编号:国字(委)检YFH2018第179号。

4 地热资源开发潜力与可持续利用

4.1 资源潜力评价

4.1.1 热储资源量估算

基于研究区热储层参数(表1),采用体积法计算地热资源总量:

$$Q = A \cdot h \cdot \varphi \cdot (T - T_0) \cdot \rho \cdot c \quad (1)$$

式中, A (热储面积):根据构造纲要图(图1)与地热井分布,估算有效热储面积约 15km^2 ; h (热储层厚度):鉴于F1断裂东西两侧热储层厚度(西侧 $500\sim 800\text{m}$ 、东侧 $200\sim 400\text{m}$)、渗透性及温度(西侧 $50\sim 62^\circ\text{C}$ 、东侧 $35\sim 42^\circ\text{C}$)差异显著,且受断裂构造控制呈现非均质性,将研究区划分为两个独立热储单元:西侧为主断裂控制的高渗透区,平均厚度 650m ,以破碎带和蚀变带为主,温度较高;东侧为次级断裂发育区,平均厚度 300m ; φ (孔隙度):破碎带孔隙度 $8\%\sim 12\%$,蚀变带 $3\%\sim 5\%$; T (储层温度): $40\sim 62^\circ\text{C}$,取平均

值 50°C ; T_0 (基准温度):当地年平均气温 16°C ; ρ (水密度): $1000\text{kg}/\text{m}^3$; c (水比热容): $4180\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

西区热储资源量: $Q_1 = 8 \times 10^6 \text{m}^2 \times 650\text{m} \times 0.08 \times 1000 \times 4180 \times (56 - 16) = 6.96 \times 10^{17} \text{J}$;东区热储资源量: $Q_2 = 7 \times 10^6 \text{m}^2 \times 300\text{m} \times 0.05 \times 1000 \times 4180 \times (38.5 - 16) = 3.12 \times 10^{17} \text{J}$ 。计算得总热储资源量 $Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 = 1.008 \times 10^{18} \text{J}$,折合标准煤当量约 3.8×10^7 吨。

4.1.2 可采资源量预测

根据地热储层渗透性($0.01\sim 1.2\text{m}/\text{d}$)及开发技术条件,选取采收率为 $15\%\sim 25\%$ 。可采资源量为:

$$Q_{\text{可采}} = Q \cdot \eta \quad (2)$$

式中, η (采收率)取 20% ,则 $Q_{\text{可采}} \approx 2.4 \times 10^{17} \text{J}$ (折合标准煤 7.6×10^6 吨)。按现有井涌水量(表1)估算,单井日产能可达 $500\sim 2000\text{m}^3$,可

满足中型温泉旅游与供暖需求。

4.1.3 开发利用适宜性分区

根据资源分布与地质条件,将研究区划分为三级开发区:

(1) 优先开发区: F1 断裂西侧(大庄村、裸心泉一带),热储厚度大(500~800m)、温度高(50~62℃)、渗透性强(0.5~1.2m/d),适宜集中开发温泉疗养与低碳供暖;

(2) 限制开发区: F1 断裂东侧(DR1、DR3 井区),热储厚度薄(200~400m)、温度低(35~42℃),建议作为后备资源区,限制大规模开发;

(3) 禁止开发区: 断裂影响带外围及第四系覆盖层较厚区域(>20m),热储不发育,需保护生态环境,禁止开采。

研究区地热资源潜力丰富,断裂控热特征显著,优先开发区的科学利用可支撑“温泉小镇”建设,同时需结合动态监测与回灌技术实现可持续开发。

4.2 生态环境保护对策

4.2.1 地热开发环境影响评估

地热开发需重点评估对地下水系统的扰动风险,尤其是高氟(10.7~18.2mg/L)、高硅(41.7~58.0mg/L)热流体可能引发的水质污染。需建立地下水动态监测网络,实时追踪氟离子扩散范围及热储压力变化,防止化学组分超标影响周边生态环境。同时,需评估热流体抽取对地表沉降的潜在影响,结合 InSAR 技术监测地面形变。

4.2.2 地质灾害防治措施

针对断裂带活动性(微震震源深度<10km),需在 NE 向 F1 断裂交汇区布设地震监测台网,预警构造活动引发的滑坡、地裂缝等灾害。对开发井周边边坡进行工程加固(如锚杆支护、植被恢复),降低岩体失稳风险。严禁在禁止开发区(第四系覆盖层>20m)进行钻探,避免破坏脆弱地质结构。

4.2.3 可持续开发管理体系构建

推行“采灌均衡”模式,通过回灌井将利用后的尾水注入深部储层(循环深度>1500m),维

持热储压力与水热平衡。建立资源开发准入制度,划定优先开发区(如大庄村井)的年度开采限额($\leq 2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)。联合政府、企业与科研机构,制定地热资源保护法规,确保开发与生态修复同步实施。

5 结语

本研究系统揭示了宁海县深甬镇地热流体的富集规律与断裂控热机制,构建了以“深循环加热-断裂交汇富集-封闭性调控”为核心的断裂控热型地热系统模型。研究表明,NE 向 F1 断裂及其次级断裂交汇区是地热异常的核心赋存部位,热储层温度(40~62℃)、渗透性(0.1~1.2m/d)及化学组分(氟、硅富集)的空间分异受断裂构造-岩性耦合控制。资源潜力评价显示,研究区总热储资源量达 $1.2 \times 10^{18} \text{ J}$,优先开发区(F1 断裂西侧)具备温泉疗养与低碳供暖的开发潜力。通过动态监测、采灌均衡及地质灾害防控措施,可实现资源开发与生态保护的协同发展。

参考文献(References):

- [1] 李佳佳,王金香,孔帅. 枣庄市滕州地热田地热特征分析及开发利用建议[J/OL]. 陕西煤炭, 1-8 [2025-04-04].
- [2] 刘先录,胡光明,肖红平,等. 松辽盆地重点油区水热型砂岩地热储层评价[J/OL]. 地质科技通报, 1-18 [2025-04-04].
- [3] 张蒙蒙. 陇东盆地地热资源综合地球物理勘探与数值评价研究[J]. 华北自然资源, 2025, 24(01): 32-34.
- [4] 韩润生,张艳. 初论矿产勘查系统理论: 热液矿床控制-映射勘查系统架构[J/OL]. 地学前缘, 1-28 [2025-04-04].
- [5] 崔尧. 陇中盆地内部活动断裂及其动力学分析[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2023.
- [6] 叶志伟. 非均匀热储工质载热运移机理与热能抽采理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [7] 毛官辉,张立勇,陈俊兵,等. 浙江省大地热流及其地热资源意义[J]. 地球科学, 2023, 48(03): 1030-1039.

- [8] 王具文, 张旭儒, 宁天祥, 等. 张掖盆地地热资源地质特征分析与研究[J]. 地下水, 2019, 41(03): 5-6.
- [9] 刘前进, 黄迅, 董毓, 等. 江西邵武-河源断裂带会昌断裂控热机理研究[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(02): 154-160.
- [10] 吴姗姗, 戴康明, 王军成. 南京羊山地区断裂构造解析与地热资源研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(06): 834-839.
- [11] 颜玉聪, 周晓成, 朱成英, 等. 2020 年新疆伽师 M_L(S)6.4 地震前后伽师地区温泉水文地球化学特征[J]. 地震研究, 2022, 45(02): 229-240.
- [12] 吴姗姗, 姚维军, 李琳, 等. 苏北赣榆-和安湖地区地球物理特征和地热条件分析[J]. 地质论评, 2022, 68(04): 1501-1510.
- [13] 杨明远, 赵佳怡, 马超, 等. 新疆博阿断裂附近地表水和地下水的水化学和同位素特征及水质评价[J]. 西北地质, 2023, 56(06): 186-197.
- [14] 杨明远, 张汉雄, 马超, 等. AMT 在新疆三屯河地区地下赋水性研究中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(06): 1441-1449.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 陈书阁, 1990 年生, 男, 河南宝丰人, 中国煤炭地质总局水文地质局, 工程师, 主要研究方向为水文地质。Email: 3066825841@qq.com

Study on the Enrichment Law of Geothermal Fluid, Characteristics of Controlled Heat Faults and Development Potential in Shen Zhen Town, Ninghai County

CHEN Shuge

(China Coal Geological Bureau Hydrogeology Bureau Handan City, Handan 056000, China)

Abstract: This paper takes the geothermal field in Shen zhen Town, Ninghai County as the study area, which aims to reveal the control mechanism and enrichment law of fault structures on geothermal fluids. Through field geological survey, geophysical exploration and geochemical analysis, the geometrical characteristics, activity and heat control effects of Ne-direction and NW-direction faults are systematically studied. The results show that a highly permeable fracture network is formed in the fracture intersection area, dominant in the vertical deep circulation (2000-3000m) and shallow enrichment of thermal fluids. The temperature of the thermal reservoir reaches 40-62°C, and trace elements, such as fluorine and silicon, are significantly enriched. A three-in-one fault heat control type geothermal system model of “deep circulation heating-fault convergence enrichment-closure regulation” was constructed. The total heat reserve resource is evaluated to be 1.2×10^{18} J. The priority development zone (west side of F1 fault) has the potential for hot spring therapy and low-carbon heating development. The research results provide theoretical support for the scientific development and ecological protection of geothermal resources.

Key words: geothermal fluids; enrichment rule; thermal fracture control; heat storage characteristics