

埕宁隆起区高水温地热资源影响因素研究

刘伟,李东亮,王学鹏,赵书兴,秦学全

(山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院),山东 德州,253000)

摘要:埕宁隆起区属于典型的层状热储,地热井口水温往往小于60℃,但是以山东省宁津县相衙镇为代表的深部岩溶热储,水温却高达78~82℃,存在明显的高水温异常。本文在收集以往研究成果的基础上,采用地热地质专项调查、地球物理勘探、岩矿测试等工作手段,初步查明了断裂构造是引起区内深部岩溶热储高水温的主控因素,并明确热源、水源、盖层、通道、热储层各个相关因子,从而建立热储概念模型,为区内深部岩溶热储地热资源的合理开发提供指导意义。

关键词:埕宁隆起;宁津县相衙镇;高水温异常;断裂构造;热储概念模型

中图分类号: P314

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2023)03-0067-09

地热资源是一种绿色的清洁能源,具有节能环保、可再生等优势,现已广泛利用于医疗保健、洗浴、供暖、养殖等领域^[1-10]。大力发展地热资源对于缓解能源紧张、保护环境起着十分重要的作用^[11]。在全面落实国家“双碳”目标的大背景下,地热资源高质量开发利用已愈来愈重要^[12]。在国外,地热资源的开发利用研究已经初具规模,主要集中在欧洲、北美、亚洲等地区,研究方法主要是利用地热探测技术、地球化学分析及地热场模拟等手段,利用方向有供暖、地热发电、温室养殖等;国内的地热资源开发利用与研究,不仅建立了一套完整的地热资源勘查、利用、评价方法,在地热井的定向施工、地热尾水回灌、井下换热技术等研究方向表现突出。地热概念模型,是基于水文地质条件、地热地质条件,将地热系统的热储、盖层、通道、热源进行概化的模型。当前,国内外普遍倾向于三维地热概念模型的研究。

埕宁隆起区极值地理坐标为东经116°29′~118°01′,北纬36°25′~38°12′,涉及山东宁津、乐陵、陵城、临邑、商河、惠民、庆云、无棣、沾化、阳信多个行政区,面积约4 500 km²。

自20世纪60年代以来,石油、地矿部门采取地热地质调查、地质物探、钻探等工作手段在区内开展了一系列地热资源的勘查研究工作,认为区内地热资源类型以层状孔隙-裂隙热储为主,热水成因为热

传导型,井口水温普遍小于60℃,属于温热水。虽然区域上开展了大量地热地质工作,但针对深部岩溶热储地热工作基本属于空白,结合近年施工的地热井及本次研究投入的地球物理勘探、岩矿测试等工作手段,研究发现以山东省宁津县相衙镇为代表的深部岩溶热储呈现高水温的显著特点,本文从基底形态、地质构造、岩性特征等地质条件分析,得出引起高水温的主控因素为“断控”。

1 地热地质特征

1.1 区域地质及热储特征

研究区在大地构造上属于华北地台,受古生代差异性升降运动的影响,研究区深部地层分布具有明显的差异性。在凸起区一般缺失古近系,新近系直接覆盖于太古界、古生界或中生界之上;凹陷区新生界发育较齐全,厚度大于3 000 m(图1)。

根据区域地质资料,区内新生界及其基底地层自老至新分述如下:

1.1.1 太古代泰山群变质岩系(Art)

该地层在工作区内有揭露,隐伏于新近纪馆陶组之下,顶界面埋深1 200~1 300 m,岩性为闪长片麻岩、片岩夹大理岩及混合片麻岩等变质岩系,与上伏地层呈不整合接触。

1.1.2 古生界

收稿日期:2023-01-03

资助项目:山东省地质矿产勘查开发局2020年度局控地质勘查和科技创新项目:“埕宁隆起地热资源调查评价(202017)”

作者简介:刘伟(1988-),男,工程师,主要从事水工环地质、地热地质调查工作,E-mail:793693284@qq.com;

*通讯作者:王学鹏(1990-),男,工程师,主要从事水工环地质、地热地质调查工作,E-mail:1029393006@qq.com。

<http://hbdz.org.cn>

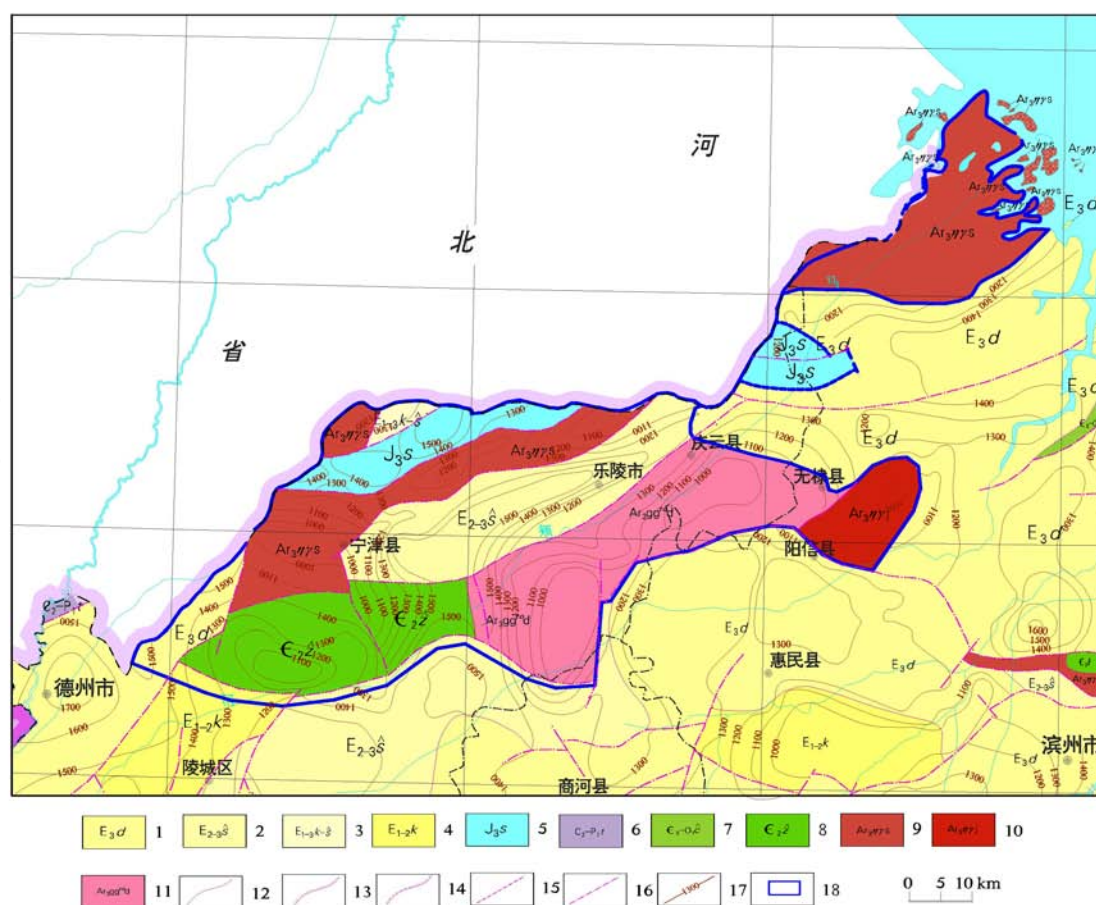


图1 研究区区域地质图

Fig.1 Regional geological map

1. 古近纪东营组;2. 古近纪沙河街组;3. 古近纪孔店组-沙河街组;4. 古近纪孔店组;5. 侏罗纪三台组;6. 石炭-二叠纪太原组;7. 寒武纪沙米店组;8. 寒武纪张夏组;9. 新太古代中粒二长花岗岩;10. 新太古代条带状中粒黑云二长花岗岩;11. 新太古代条带状中细粒黑云英闪长质片麻岩;12. 隐伏地质界限;13. 隐伏角度不整合界限;14. 隐伏平行不整合界限;15. 推测断层;16. 物探解译断层;17. 第四系+新近系等厚线/m;18. 研究区

工作区内古生界发育有下古生代寒武-奥陶系及上古生代石炭-二叠系,上、下古生界之间为一很长的沉积间断期,缺失志留系与泥盆系。

(1) 寒武-奥陶系(ϵ -O)

在研究区凸起区有揭露,隐伏于新近系之下,凸起区埋深一般为1 000~2 500 m,凹陷区埋深一般大于3 000 m。奥陶系主要岩性为白云质灰岩、厚层灰岩、豹皮状灰岩、泥质灰岩等;寒武系主要岩性为鲕状灰岩、厚层砂岩、竹叶状灰岩及页岩等,该地层与上覆地层不整合接触。

(2) 石炭、二叠系(C-P)

主要隐伏于新生界之下。石炭系主要岩性为泥岩、砂岩夹薄层灰岩及煤层;二叠系主要岩性为砂岩、页岩及杂色粘土岩夹薄煤层,该地层与上覆地层不整合接触。

1.1.3. 中生界

研究区内中生界发育有白垩、侏罗系,缺失三叠系,主要在长官潜凹陷及柴胡庄潜凹陷构造单元中有揭露。隐伏于新生界之下,顶板埋深1 300~1 500 m。侏罗系主要岩性为灰、灰绿、紫红色泥岩、页岩夹含砾砂岩;白垩系主要岩性为红色泥岩、砂岩、砾岩及火山碎屑岩等。

1.1.4. 新生界

(1) 古近纪孔店组(E_{1-2k})

厚度超过1 500 m。本组分三段,自下而上分述如下:孔三段岩性为灰绿色、紫灰色厚层玄武岩夹少量紫红色及灰色泥岩、砂质泥岩。孔二段主要是一套暗色湖相沉积,岩性为灰色泥岩夹砂岩、含砾砂岩、炭质泥岩及煤层等,厚度100~700 m。孔一段岩性为棕红色砂岩与紫红色泥岩互层,上部常含石膏

泥岩及薄层石膏和钙质砂岩成组出现,厚300~800 m。其下段与中生界角度不整合接触,上段与沙河街组不整合接触。

(2)古近纪沙河街组($E_{2,3\delta}$)

厚度超过3 000 m,分布较广泛,自下而上为沙四段:下部为泥岩和石膏、盐岩、钾盐互层;上部为泥岩、页岩、白云岩,凹陷边缘地区常相变为生物礁灰岩,厚度变化很大。沙三段湖相沉积,岩性较稳定,厚度在1 100 m左右,下部为泥岩、油页岩、油泥岩互层的油页岩集中段,厚度100~200 m;中部为泥岩,厚度500~600 m,属深湖和较深湖相沉积,生物繁茂,有机质含量多,为区内的重要生油层系;上部为厚层块状砂岩泥岩互层,厚度300~400 m,为冲积扇及滨湖三角洲沉积。沙二段为泥岩、砂岩、含砾砂岩、砾状砂岩互层,厚度200~300 m。沙一段厚200~500 m,岩性为泥岩碳酸岩和油页岩,生物化石丰富。下段与孔店组不整合接触,上段与东营组和馆陶组整合接触。

(3)古近纪东营组(E_3d)

该地层在凸起区缺失。厚度100~300 m,与沙一段呈连续沉积。岩性多以浅灰白色粉砂岩、细砂岩及灰绿、棕红、灰色泥岩、泥质砂岩为主,呈互层状沉积。粉砂岩、细砂岩主要成份为石英、长石,颗粒分选及磨圆度一般。泥岩质纯、性硬,含少量钙核。下段与沙一段整合接触,上段与黄骅群馆陶组角度不整合接触。

(4)新近纪馆陶组(N_1g)

厚度100~300 m,该地层上部岩性为灰白色、浅灰色细-中砂岩及棕红色、灰绿色泥岩与细砂岩互层夹粉砂岩;下部岩性为灰白色、灰色厚层状、块状砾岩、含砾砂岩、砂砾岩、细砂岩夹灰绿色粉砂岩、棕红色泥岩及砂质泥岩;底部普遍发育含石英、燧石的砂砾岩。下段与东营组不整合接触,上段与明化镇组整合接触。

(5)新近纪明化镇组(N_2m)

厚度600~800 m,上部岩性以土黄、棕红、棕黄色等杂色砂质粘土、砂质泥岩、泥岩和灰白色、浅灰色粉砂岩、细砂岩为主,局部夹灰绿色泥岩及钙质结核,压性结构面发育。泥岩成岩性较差,遇水膨胀,砂岩多为松散状,为泥质或钙质胶结。下部岩性以棕红、灰绿色砂质泥岩、泥岩及浅灰、灰白色细砂、中细砂岩为主,局部含石膏晶片。泥岩成岩性较好,较

脆;砂岩胶结(固性)较差,颗粒分选性及磨圆度中等,成分以石英为主,长石次之。下段与馆陶组整合接触,上段与第四系整合接触。

(6)第四纪平原组(Q_{pp})

厚度250~300 m,上部岩性为浅黄、灰黄色砂质粘土、粘质砂土、粉土夹粉砂,下部岩性为浅灰色、棕红、灰绿色砂质粘土、粘土与粉砂、细砂互层,钙质结核发育,粘性土结构致密。底部见钙质胶结砂岩,与下伏新近纪明化镇组整合接触。

目前,研究区内揭露深部岩溶热储的地热露头,共有4眼,2采2灌,均位于山东省宁津县相衙镇,用途为社区冬季供暖,取水段介于1 047.73~1 256.00 m之间,属于馆陶组热储层与寒武-奥陶系岩溶热储层的混合开采,表现出高水温的显著特点(表1)。

根据已有地热井钻探资料^[13],研究区馆陶组热储顶板埋深介于1 050~1 100 m,底板埋深介于1 150~1 200 m,厚度一般150 m左右,岩性以细砂岩为主,夹薄层粉砂岩,磨圆度中等,分选性一般,泥质胶结,孔隙、裂隙发育,孔隙度为16.39~33.12%;寒武-奥陶系岩溶热储顶板埋深介于1 150~1 200 m,受基底构造控制明显,岩性以石灰岩、白云岩为主,裂隙发育程度较好。

1.2 地温场特征

平面上,通过调查及收集取得的地热井井温与取水段资料^[14],绘制了研究区深部岩溶热储盖层地温梯度等值线图(图2)。通过该图可以看出区内深部岩溶热储盖层地温梯度变化范围为2.8~4.5℃/100 m,其地温梯度水平分布特征如下:

(1)盖层地温梯度分布受地质构造格局控制明显,正向构造区,基岩埋藏浅,盖层地温梯度大;在负向构造区,基岩埋藏深,盖层地温梯度小^[15]。盖层地温梯度在基底埋藏深的凹陷区普遍小于3.0℃/100

表1 研究区地热井基本情况

Table 1 Basics of geothermal wells in the study area

井孔类别	位置	成井深度/m	取水段/m	热储代号	成井水温
开采井	山东省宁津县相衙镇温泉小区	1 256.00	1 047.73~1 256.00	$N_1g+\epsilon-O$	78℃
回灌井	山东省宁津县相衙镇温泉小区	1 300.00	1 151.00~1 300.00	$N_1g+\epsilon-O$	82℃
开采井	山东省宁津县相衙镇京城张社区	1 285.00	1 096.50~1 274.00	$N_1g+\epsilon-O$	80℃
回灌井	山东省宁津县相衙镇京城张社区	1 287.00	1 086.80~1 276.50	$N_1g+\epsilon-O$	80℃

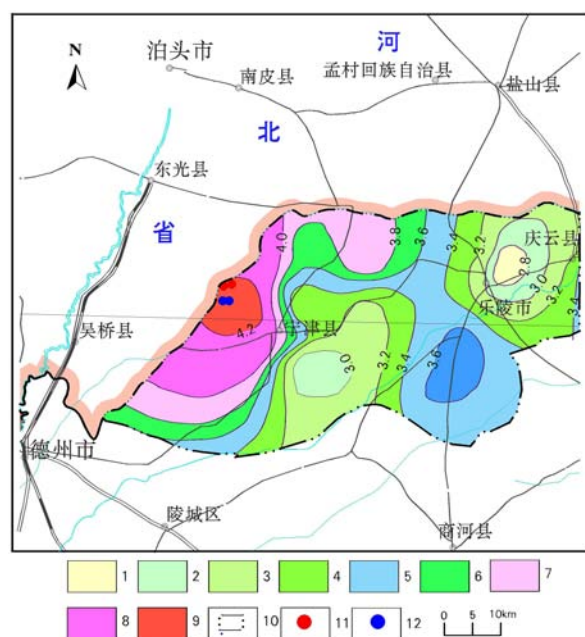


图2 研究区盖层地温梯度等值线图

Fig. 2 equivalence diagram of the geothermal gradient of the cover of the research area

1. $<2.8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 2. $2.2.8\sim3.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 3. $3.3.0\sim3.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 4. $3.2\sim3.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 5. $3.4\sim3.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 6. $3.6\sim3.8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 7. $3.8\sim4.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 8. $4.0\sim4.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 9. $>4.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 10. 研究区; 11. 山东省宁津县相衙镇京城张社区开采井及回灌井; 12. 山东省宁津县相衙镇温泉小区开采井及回灌井

m;在太古界结晶基底埋藏浅的凸起区及中生代火山岩发育区,地温梯度一般大于 $3.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。地温梯度等值线与区内基底构造的走向基本一致,其走向呈ENE向^[16]。

(2)岩浆岩尤其是古元古代侵入岩,对地温梯度具有明显的影响,如山东省宁津县相衙镇,地温梯度值普遍大于 $4.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

垂向上,以山东省宁津县相衙镇京城张社区地热回灌井为例,钻探结束后采用SKD3000B测井车,以8米为间隔点进行连续测温,通过测温数据计算地温梯度,并绘制了测井曲线(图3)。研究发现,地温值随井深度的增加而递增,呈正相关关系,全孔平均地温梯度为 $4.54^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。第四纪地层(0~400 m)结构松散,热导率低,地温梯度高;新近纪地层(400~1 200 m)大致分为2段,其中400~800 m段对应的地层为新近纪明化镇组,地层相对致密,地下水处于相对封闭的地质环境,受对流影响小,地温梯度高,约 $6\sim7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$;而800~1 200 m段对应的地层为新近纪馆陶组的细砂岩、粉砂岩等,由于结构致密,热传导率大,地温梯度相对较低,约 $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右;

古生界寒武-奥陶系地层(1 200~1 250 m),地温梯度骤高,推测断裂构造影响所致。

1.3 地热流体水化学特征

研究区高水温地热流体取样深度介于1 047.73~1 300 m,为馆陶组热储层与寒武-奥陶系岩溶热储层的混合开采,由于埋藏较深,属于成因水动力系统。馆陶组地热水与寒武-奥陶系岩溶地热水,通过深循环在地温作用下混合加热,矿化度 $5.91\sim5.96\text{ g/L}$,表现出了高于常规馆陶组热储矿化度、低于常规寒武-奥陶岩溶的矿化度的显著特征。

地热流体水化学类型为Cl-Na型;阳离子主要是 Na^+ ,质量浓度为 $1\ 869.00\sim1\ 896.25\text{ mg/L}$,阴离子主要是 Cl^- ,质量浓度为 $3\ 008.82\sim3\ 163.91\text{ mg/L}$;总硬度为 $723.08\sim885.71\text{ mg/L}$,属于极硬水;pH值为 $7.16\sim7.29$,属于中水;富含锂、锶、溴、碘、偏硼酸、偏硅酸等微量元素,个别元素达到了矿水命名浓度。

1.4 地热水氢氧同位素及循环特征

根据收集的地热水氢氧同位素分析资料,研究区内深部岩溶热储地热水氢氧同位素点均位于中国雨水线($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$)之下(图4),表明地热水主要为大气降水成因,通过深循环在地温作用下加热

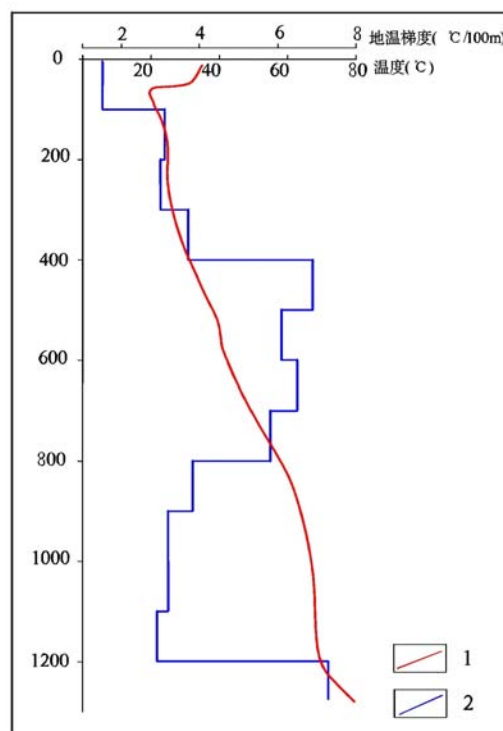
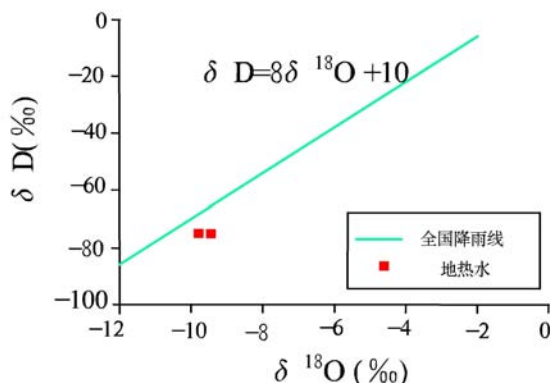


图3 地热回灌井测温曲线图

Fig.3 Geothermal recharge well temperature measurement curve

1. 温度曲线; 2. 地温梯度曲线

图4 地热水中 D、¹⁸O 同位素关系图Fig.4 Map of D and ¹⁸O isotope relationships in geothermal water

而形成的。

根据区域大气降水的 gradD 值得,地热水来源主要为附近海拔 242.22 m ~ 239.22 m 高处的大气降雨。地热水 2 H 过量参数 d 值总体偏小,说明该区地下水径流速度慢,径流时间长,地质环境封闭,地热水可更新能力弱。

根据 ¹⁴C 同位素测龄资料,研究区内岩溶热储地热水的 ¹⁴C 年龄为 1.929 ~ 2.259 万年。由于 ¹⁴C 分析水样的采集过程或多或少要与现代大气接触,现代大气中的 CO₂ 进入所采集的水样中,使所测年龄要远小于地下水的实际形成年龄。由此可见,区内地热水的形成年代久远,其补给途径长,径流速度缓慢。

2 影响因素研究

相对于研究区内传统的馆陶组热储,以山东省

宁津县相衙镇为代表的深部岩溶热储表现出埋藏浅、水量大、温度高的特点,这与其独特的地质成因条件有关。

2.1 基底起伏

前人研究表明,基底起伏对地温场影响较大^[17]。地下热流在传导过程中总是向着导热系数高、热阻小的部位偏移而易形成热异常^[18],并提出隆起带具有高温异常,地温场的高低和基底起伏具有正相关关系^[19]。研究区的基底是太古宙变质岩,顶界埋深约 5 ~ 6 km,小于周边凹陷区的 7 ~ 8 km,莫霍面埋深约 37 km,相对隆起,地壳厚度小,利于地幔热源补给、聚集,易产生高地温。

2.2 “断控”作用

自中生代以来,该地区构造活动强烈,主要受控于欧亚-印度洋板块碰撞、太平洋板块俯冲及郯庐断裂剪切等作用^[20-21],区域上断裂构造发育,主要为 NE、NNE 向,由南向北,主要有陵城区-老黄河口断裂、边临镇-羊二庄断裂、推测的隐伏断裂 F3、F4(图 5)。

陵城区-老黄河口断裂属北盘上升,南盘下降正断裂,断裂呈弯曲状,走向 NE,倾向 SW。边临镇-羊二庄断裂属南盘上升,北盘下降的张性正断裂,断裂带走向 NE,倾向 NW。

为了查明研究区的地质构造特征,也为了验证前已述及的测温孔深部地温梯度骤高受断裂构造影响所致的猜测,在山东省宁津县相衙镇周边布置了 4 条大地电磁测深勘探线,通过抽取 L80、L90、L100、L110 剖面大地电磁测深断面上 -500 m、-1 000 m、-1 500 m、-2 000 m 深度上的视电阻率值,做出各

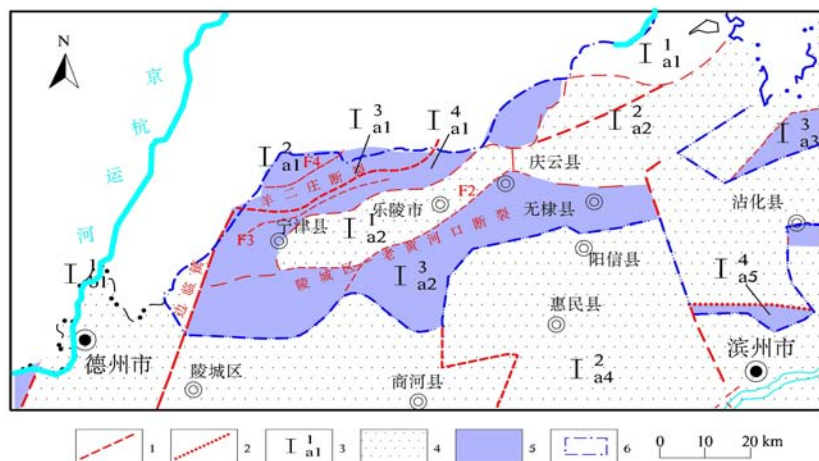


图5 区域断裂构造图

Fig.5 Regional fracture tectonic diagram

1.断层构造线;2.不整合界限;3.单元代号;4.凹陷区;5.隆起区;6.研究区

深度上水平方向视电阻率分布示意图(图6),对以上剖面区的地层、构造情况进行分析研究。

研究发现,本区-500 m 深度以上整体显示低阻异常特征,本区-1 000 m 深度以上整体显示中低阻异常特征,视电阻率等值线稀疏、宽缓,认为本区内大面积沉积着大于1 000 m厚的覆盖层,为区内地热成矿提供了重要的保温盖层条件,结合区内地质资料,分析认为本区主要保温盖层为第四系、新近系明化镇组、馆陶组等地层。

以视电阻率大于 $500 \Omega \cdot m$ 为区内寒武-奥陶系的标志地球物理特征,推断该层顶板埋深一般大于1 500 m,但其受构造作用影响,在区内中部地层隆起,使得寒武-奥陶系地层在本区中部的顶板埋深小于1 500 m,形成高阻异常区,根据其空间位置判断寒武-奥陶系地层在L90、L100线所控制范围埋深较浅。在勘查区中部偏东存在一处低阻异常,位置紧

靠寒武-奥陶系地层隆起范围,推断此处地层岩性破碎,裂隙岩溶较发育,易形成富水区,即可作为区内地热成矿的重要热储层条件。

本区存在两处视电阻率等值线梯级带,等值线密集,视电阻率变化大,结合各剖面分析成果,推断存在两条断裂构造带,即前述推断的F3、F4断裂(图7)。

山东省宁津县相衙镇周边,断裂构造分布广泛,以边临镇-羊二庄断裂以及隐伏的F3、F4断裂为代表的深大断裂,多为走向北东、倾向北西,切割深度较大,影响范围较广,构造特征为张性,其导热作用明显,是引起区内深部岩溶热储高水温的主控因素。

(1) 导水作用

研究区内地下热水除部分源于盆地沉积物形成时保存下来的沉积水和封存水外,绝大部分为沉积物形成后远近山区的侧向径流补给^[22]。研究区内地势整体西高东低,大气降水入渗补给地下水后沿着地形坡降自西向东径流,沿着导水构造汇集形成地热水富集区,边临镇-羊二庄断裂以及隐伏的F3、F4断裂切割多段地层,促进了地下水的深循环,具有较强的导水能力。

(2) 导热作用

断裂的导热作用,主要体现两方面,即浅部导热作用和深部控热作用。根据前面述及的研究区盖层地温梯度等值线图(图2),靠近断裂的盖层地温梯度普遍大于 $3.4^\circ C/100 m$,远离断裂的盖层地温梯度一般小于 $3.0^\circ C/100 m$,盖层地温梯度的高值中心往往偏向于断裂,说明在断裂附近,热流活动强烈。

研究区的热源主要来自正常的地壳深部及上地幔传导热流和深部岩浆热,区内断裂是规模较大的深大断裂,深度断至莫霍面^[23],它们除了本身提供一定的摩擦热能外,这些断裂对地壳深部和上地幔的岩浆热源起到了重要的沟通和传导作用,并构成地下热流的良好通道^[24]。

放射性元素衰变也是重要热源之一,放射性元素含量大,释放的热量越高,可沿断裂向上传导。根据本次采集及收集的水质资料,研究区内深部岩溶热储热水中总 α 含量为 $0.4985 Bq/l$,总 β 含量为 $1.4013 Bq/l$, ^{226}Ra 含量为 $0.1927 Bq/l$, ^{222}Rn 含量为 $549 Bq/l$,相对于其它热储,区内地下热水放射性元素的含量相对较大(表2)。

综上,地质构造不仅是地热资源中水源和热储

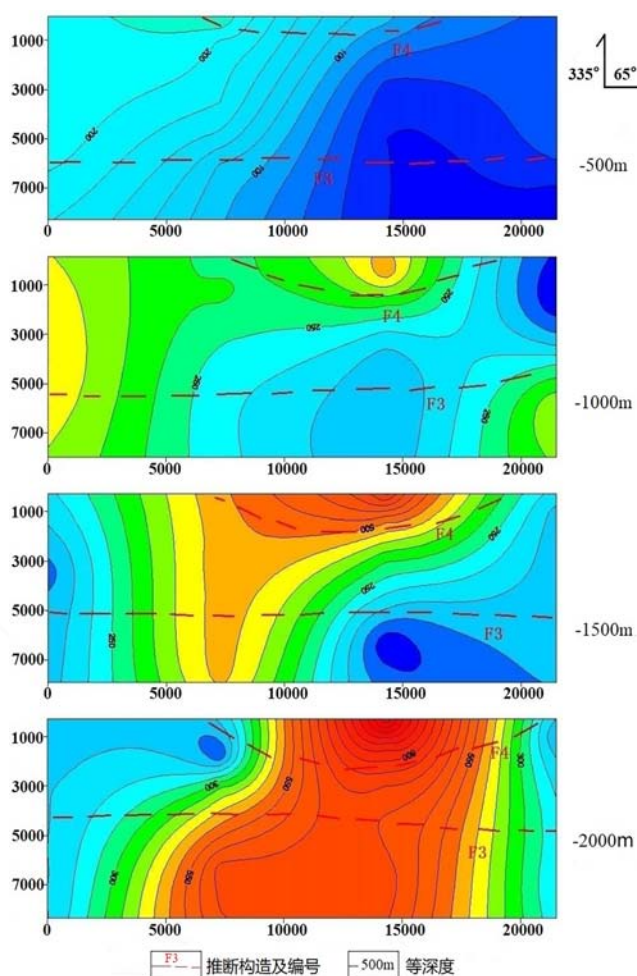


图6 L80-L110 不同深度水平切片视电阻率等值线图
Fig.6 L80-L110 Horizontal Slices of Different Depths
Resistivity Equivalent Line Diagram

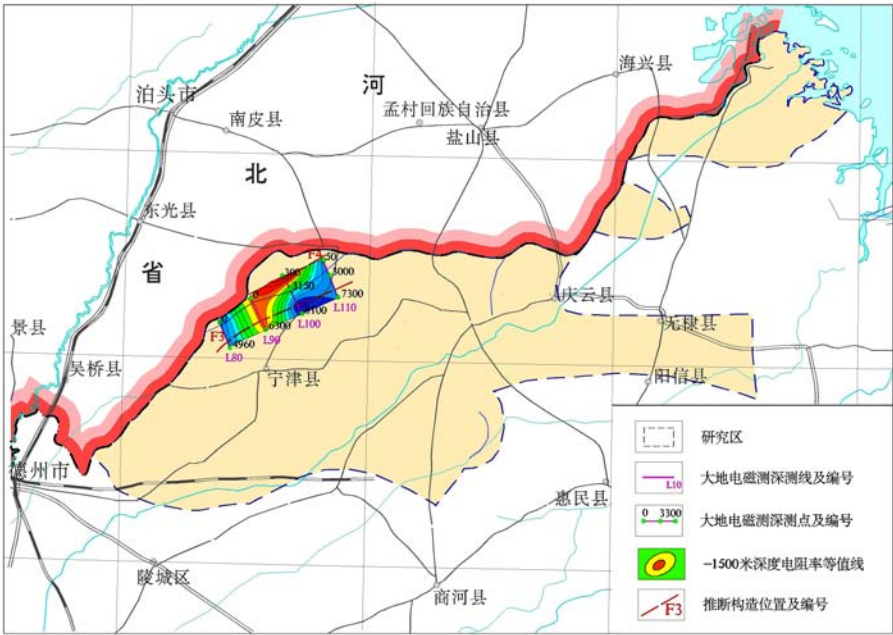


图7 物探解译 1 500 m 深电阻率等值线及推断断裂位置

Fig.7 Exploration and interpretation of 1 500 m deep resistivity contour and inferred fracture position

表2 地热水放射性元素含量一览表

Table 2 Contents of radioactive elements in geothermal water

位置	热储代号	总α(mBq/l)	总β(mBq/l)	226Ra(mBq/l)	222Rn(mBq/l)
宁津华日家具厂	N ₁ g	44.70	339.00	27.1	155.0
京城张社区开采井	N ₁ g+ε-0	498.50	1 401.30	192.7	2 549.0

层的间接创造者,构造断裂亦为水源与热源的流通提供了有利通道^[25]。经过以上分析,认为研究区附近深大断裂分布广、规模大,构造特征为张性,一方面摩擦增热,另一方面起到导热、导水作用,是形成区内高水温地热资源的主控因素。

2.3 岩石热导率

岩性不同,热导率差异性较大。正常情况下,时代越老、越致密的岩石,热导率越高,热阻越小。根据前已述及的垂向地温场特征可知,研究区内底部基岩热导率高,热阻率小,新生界的松散沉积物热导率低,热阻大,可阻碍热流向上运动,起封存、保温盖层作用。

2.4 岩性特征

研究区内馆陶组热储裂隙、孔隙发育,孔隙度为16.39%~33.12%,F3隐伏断裂受应力影响,致使底部寒武-奥陶系热储岩石破碎、裂隙发育。热储裂隙、孔隙发育特征,一方面形成了良好的储水空间,利于地下热水循环,另一方面也益于深部热量的传输。

2.5 热储概念模型

研究区位于华北板块东部,古生代时期构造稳

定,属离散型陆缘的陆架沉积环境;晚古生代时期,由于加里东运动上升,经历长期剥蚀夷平,基本上已准平原化,进入内陆盆地发育阶段;新生代以来,研究区构造活动强烈,发生整体断落,局部继续隆起并发生小断陷,各断陷沉积差异大。

复杂的地质构造活动演化,造就了区域上凹凸相间的地质构造格局,加上岩性热导率的差异性,为大地热流的传导与重新分配提供了基础条件;再者,区内断裂构造发育,影响深度大,起到了导热、导水作用;热储岩性的孔隙率、裂隙率,促进了地下水强烈活动,进而增温;巨厚的新生代地层起到了保温作用。在众多因素的综合影响下,才得以形成区内高水温地热资源(图8)。综上,研究区热储属于典型的“断控”层状热储。

3 开发利用建议

根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010),成井深度3 000 m以内属于经济型地热。当前,以山东省宁津县相衙镇为代表的深部岩溶热储呈带状,面积约51.41 km²,当前仅有2眼地热开采井

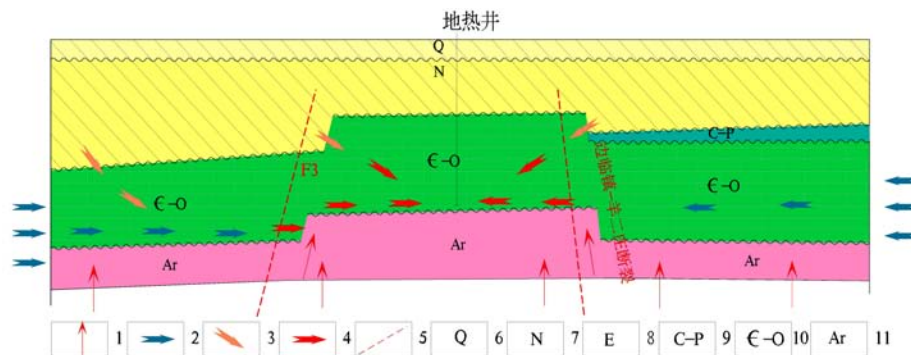


图8 热储概念模型示意图

Fig.8 Schematic diagram of the concept model of heat storage

1.大地热流;2.侧向补给;3.越流补给;4.地热水径流;5.断裂;6.第四系;7.新近系;
8.古近系;9.石炭-二叠系;10.寒武奥陶岩溶热储;11.泰山岩群

及配套的2眼地热回灌井,开采深度在1 250~1 300 m,开采潜力较大,可在总开采量小于允许开采量、“采灌均衡”的前提下,继续推进区内地热资源的勘查与开发利用进程。

研究区内地热流体温度在80℃左右,开发利用中应充分利用其热资源与水资源,最大限度地开发地热资源的潜能,做到高效节约地利用地热资源。地热资源的梯级开发、综合利用就是根据不同地热开发利用项目对水温的不同要求,采用一定工艺多级次地从地热水中提取热能,多级次地利用地热能,充分利用宝贵的地热资源^[26]。根据国外和我国近年来开发利用地热经验,地热流体综合利用的温度见表3。

同时,为保证地热资源的可持续开发利用,建议实行采、灌结合的开发模式,提高“热”的利用率,减少废弃水排放对环境的污染,保持合理的水头以改善提取地热水的条件并降低开采利用的成本^[27]。

4 结论

地热是最重要的洁净能源之一,是未来碳中和

表3 地热流体适于利用温度一览表

Table 3 List of suitable temperatures for geothermal fluids

地热流体温度/℃	适于利用的方面	重复利用
100	干燥有机物、食品加工、洗涤、羊毛烘干	
90	制造干鱼、化冻	
80	区域供暖、农业温室	空间 洗浴 种植
70	温室、孵化、化冻	采暖 洗涤 养殖
60	畜舍供暖、温室供暖、制革	防冻
50	种植、洗浴	
40	土壤加温、养殖	
30	温水沐浴、游泳池、发酵、污水处理	
20	养殖(鱼、鸡)、化冻	

首选能源^[28],它作为一种可再生能源,具有化石能源及其他可再生能源无法比拟的优势^[29]。

埕宁隆起区,以山东省宁津县相衙镇为代表的深部岩溶热储,属于断裂构造控制型热储,呈带状分布,具有热储埋藏浅、分布面积广、岩性厚度稳定等特点,其地热流体温度一般高于80℃,含有多种有益元素,它的发现及开发利用,填补了地质研究者对区内深部岩溶热储的新认识,也为日后地热资源的合理开发提供了指导意义。

参考文献:

- [1] 康凤新.山东省地热清洁能源综合评价[M].北京:科学出版社,2018:3-7.
- [2] 李肖兰,杜绍伟,张玲,等.山东省地热资源分布与开发利用研究[J].山东国土资源,2021,37(1):37-43.
- [3] 单吉成,李丽,贾丽丽.沂源县南麻悦庄盆地地热资源成因及开发利用前景分析[J].山东国土资源,2020,36(12):40-45.
- [4] 徐军祥,康凤新.山东省地热资源[J].中国地质,1999,(9):1-10.
- [5] 刘春华,王威,卫政润.山东省水热型地热资源及其开发利用前景[J].中国地质调查,2018,5(2):51-56.
- [6] 廖忠礼,张予杰,陈文彬,等.地热资源的特点与可持续开发利用[J].中国矿业,2006,15(10):8-11.
- [7] 牟林凯.山东省地热水赋存特征及其形成模式研究[D].青岛:山东科技大学,2017:1-20.
- [8] 金秉福,张云吉,栾光忠.胶东半岛地热资源的特征[J].烟台师范学院学报:自然科学版,1999,(4):297-301.
- [9] 王宏雷,祝丽媛.临沂市温泉(井)成热机制分析与找热方向研究[J].山东国土资源,2018,34(10):99-105.
- [10] 袁杰,杨鹏,魏同政,等.日照市刘东楼地区地热资源开发利用可行性分析[J].山东国土资源,2021,37(8):21-27.
- [11] 宋美钰,刘杰,于彦,等.天津地区雾迷山组热储数值模拟研究[J].地质调查与研究,2018,41(4):306-311.
- [12] 杨吉龙,汪大明,牛文超,等.天津地热资源开发利用前

- 景及存在问题. 华北地质, 2022, 45(3):1-6.
- [13] 王学鹏, 杨询昌, 刘帅, 等. 埕宁隆起地热资源调查报告[R]. 德州: 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 2020.
- [14] 王学鹏, 王世浩, 李东亮, 等. 宁津潜凸起热储气体地球化学特征及热源成因研究报告[R]. 德州: 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 2022.
- [15] 张红红, 高焕毅, 李苹. 东营凹陷地热田特征及成因机理研究[J]. 地质学报, 2019, 93(9):184-191.
- [16] 杨询昌, 康凤新, 王学鹏, 等. 砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理—鲁北馆陶组热储典型案例[J]. 地质学报, 2019, 93(3):738-750.
- [17] 闫敦实, 于英太. 京津冀油气区地热资源评价与利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- [18] 陈墨香, 邓孝. 华北平原新生界盖层地温梯度图及其简要说明[J]. 地质科学, 1990, 3:269-277.
- [19] 毛小平. 地热田高地温异常成因机理及温度分布特征[J]. 地球学报, 2018, 39(2):216-224.
- [20] 申金超, 李士成, 张斌. 鲁西隆起和济阳拗陷耦合关系分析[J]. 地质与资源, 2018, 27(5):411-416.
- [21] 姚松, 杜金亮, 徐源, 等. 济阳拗陷上地壳速度结构与地热相关性研究[J]. 山东国土资源, 2021, 37(8):35-43.
- [22] 张保建. 聊城市城区地热资源及开发利用[J]. 山东国土资源, 2007, 23(10):15-19.
- [23] 陈洪年, 李占琪, 董华军, 等. 济宁市城区地热资源分布与开发前景初析. 地下水, 2008, 30(3):30-31.
- [24] 康凤新, 赵季初, 黄迅, 等. 华北盆地梁村古潜山岩溶热储聚热机制及资源潜力. 地球科学, 2023, 48(3):1080-1092.
- [25] 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.
- [26] 李有坤, 徐勇. 鲁西北平原地热资源开发利用及保护对策[J]. 百科论坛电子杂志, 2018, (5):258.
- [27] 张薇, 王贵玲, 刘峰, 等. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 2019, 46(2):255-268.
- [28] 马冰, 贾凌霄, 于洋, 等. 世界地热能开发利用现状与展望[J]. 中国地质, 2021, 48(6):1734-1747.
- [29] 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 2017, 44(6):1074-1085.

Study on the factors influencing high water temperature geothermal resources in Chengning uplift area

LIU Wei, LI Dongliang, WANG Xuepeng, ZHAO Shuxing, QIN Xuequan

(The Second Hydrological geological engineering Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development (Shandong geological engineering Survey Institute), Dezhou Shandong 253000, China)

Abstract: Chengning uplift area is a typical layered heat reservoir, and the geothermal wellhead water temperature is usually less than 60℃, but the deep karst heat reservoir, represented by Xiangya Town, Ningjin County, Shandong Province, has a high water temperature of 78-82℃, and there are obvious high water temperature anomalies. On the basis of collecting previous research results, this paper uses special geothermal geological survey, geophysical exploration, rock and mineral testing and other work methods to preliminologically identify fault structure as the main factor causing the high water temperature of deep karst thermal reservoir in the area, and identify the related factors of heat source, water source, cap layer, channel and thermal reservoir, so as to establish a conceptual model of thermal reservoir. It provides guiding significance for the rational development of geothermal resources in deep karst thermal reservoir.

Key words: Chengning uplift; Xiangya Town, Ningjin County; abnormal high water temperature; fault structure; conceptual model of thermal storage