

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2018.02.07
引用格式: 魏林森,张凌鹏,王婷,等.兰州市城区地热地质条件及资源开发潜力分析[J].中国地质调查,2018,5(2):45-50.

兰州市城区地热地质条件及资源开发潜力分析

魏林森,张凌鹏,王婷,励丽
(甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院,兰州 730020)

摘要:兰州市城区地处民和一兰州坳陷盆地东端的中生代断陷盆地内。盆地中因沉积巨厚碎屑岩,加之受多期地质构造运动改造,断裂构造发育,为地热水的形成创造了条件。经勘探证实,兰州城区属中低温(60~90℃)沉积盆地型地热资源,分布范围受盆地南、北2条深大断裂控制,面积约530 km²。按照地质构造单元,分3个区块对地热资源潜力进行了评价,东部城区、中部城区和西部城区地热田产能分别为17.91 MW、117.46 MW和23.49 MW,达到中—大型地热田规模,显示出良好的开发利用前景。

关键词: 地下热水资源;地质条件;兰州市城区

中图分类号: P314 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2018)02-0045-06

0 引言

地热资源是一种十分宝贵的矿产资源,同时也是一种清洁可再生能源,开发利用地热资源对遏制环境恶化、维护生态和谐、推动绿色发展具有重要作用。尤其在当今环境污染突显和化石能源短缺的情况下,大力开发地热资源更具现实意义,地热资源也因此受到了世界许多国家的重视。20世纪90年代,兰州市周边的西安市、银川市、西宁市等省会城市的地热勘查均有了较大的进展和突破。然而,兰州市的地热勘查开发程度较低。2001年以来,在市政府有关部门支持下,甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院开启了兰州市城区地热勘查研究工作,经过多年的探索,在资源勘探、利用方面都取得了一定成效。本文在收集已有资料的基础上,根据最新补充取得的大量地热勘查资料,从地热资源形成的地质背景条件入手,重点研究了兰州沉积盆地传导型地热田地热流体赋存特征及其补给、径流和排泄等地质条件,对地下热水资源的形成机理、分布规律及赋存特征等进行了阐述。按照水文地质单元划分对城区地热资源进行了评价,显示出了

较丰富的可开发资源潜力^[1-5],对加快兰州城区地热供暖,实现“兰州蓝”工程有重要的推动作用。

1 研究区概况

兰州市地热资源勘查可追溯到20世纪80年代。1985年,兰州石油机械厂在七里河区厂内试验新型钻机,试钻孔深1 903.6 m,孔口上返泥浆温度达到55.0℃,从而获取了深部地热异常信息。多年来,通过不断总结以往地质、水文地质资料,采用可控源音频大地电磁测深等手段,初步圈定了七里河地热异常区,并于2003年7月在七里河区运通大厦院内打成了兰州市第一眼地热井,井深2 003.1 m,单井出水量504.0 m³,井口水温60.3℃,取得了在兰州城区地热勘查的首次突破^[2]。近年来,在市场经济的推动下,先后围绕七里河—安宁断陷盆地边缘断裂打成了3眼水温、流量较理想地热水井,进一步证明了兰州城区地热资源赋存的可靠性,同时也为全面系统地掌握城区地热资源分布规律提供了重要依据。2015年,受兰州市国土资源局的委托,甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院利用2 a多时间,以兰

收稿日期: 2017-12-22; 修订日期: 2018-03-08。
基金项目: 甘肃省地质勘查基金“甘肃省兰州市城区地热资源普查(编号: 2017-D21)”项目资助。
第一作者简方数据(1963—),男,教授级高级工程师,主要从事水文地质及地热勘查研究评价工作。Email: 3451880@qq.com。

州市城区为重点,开展了专项地热资源勘查工作,范围包括兰州市中心城区,面积 260 km² (图 1)。

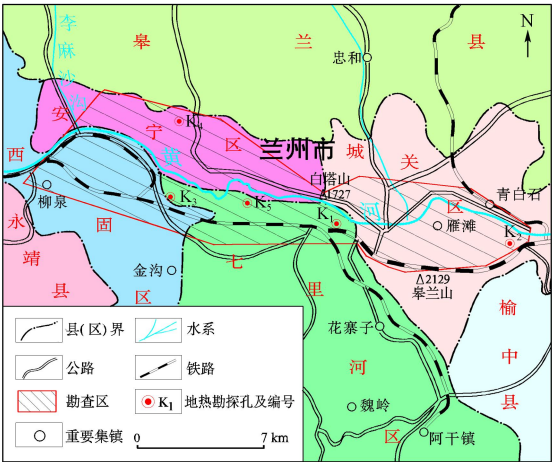


图 1 兰州市城区交通及地热勘查区位置
Fig. 1 Location of traffic and geothermal exploration area in Lanzhou City

此次地热勘查在全面收集研究已有地热资料的基础上,先期投入了大量的地面调查、物探等工作,从区域上对城区一带地热田热储、盖层分布特征及其空间赋存条件做到了一定的控制。根据前期勘查成果,选择在七里河—安宁断陷盆地中央部

位实施了一眼深 2 502.0 m 的地热勘探孔,经抽(放)水试验,自流量 26.25 m³/h,出口水温 68.0 ℃;单井抽水量稳定在 90.0 m³/h,井口水温 74.0 ℃,水质达到国家理疗矿泉水标准。该地热井是兰州市及甘肃省迄今井深最深、水量最大、水温最高的地热水井,首次证明了七里河—安宁断陷盆地中央部位有丰富的地下热水资源存在,对认识七里河—安宁断陷盆地及其以外整个城区盆地型层状地热田规模提供了重要的地质依据。

2 地热地质条件分析

2.1 控热地质构造

兰州市城区地处民和—兰州拗陷东端的兰州断陷盆地内,市区南、北均受断裂构造控制(图 2)。主要断裂有金城关断裂(F₁)、宋家沟—直沟门断裂(F₂)和刘家堡—雁滩南隐伏断裂(F₃),其中金城关断裂(F₁)和宋家沟—直沟门断裂(F₂)构成兰州拗陷南和北边界,对兰州市城区地热田的形成和控制起着决定性的作用。断裂南、北两侧中生界沉积有明显差异,最大厚差达 2 000 余 m。据区域资料,兰州断陷盆地主要形成于白垩纪早期至新近纪

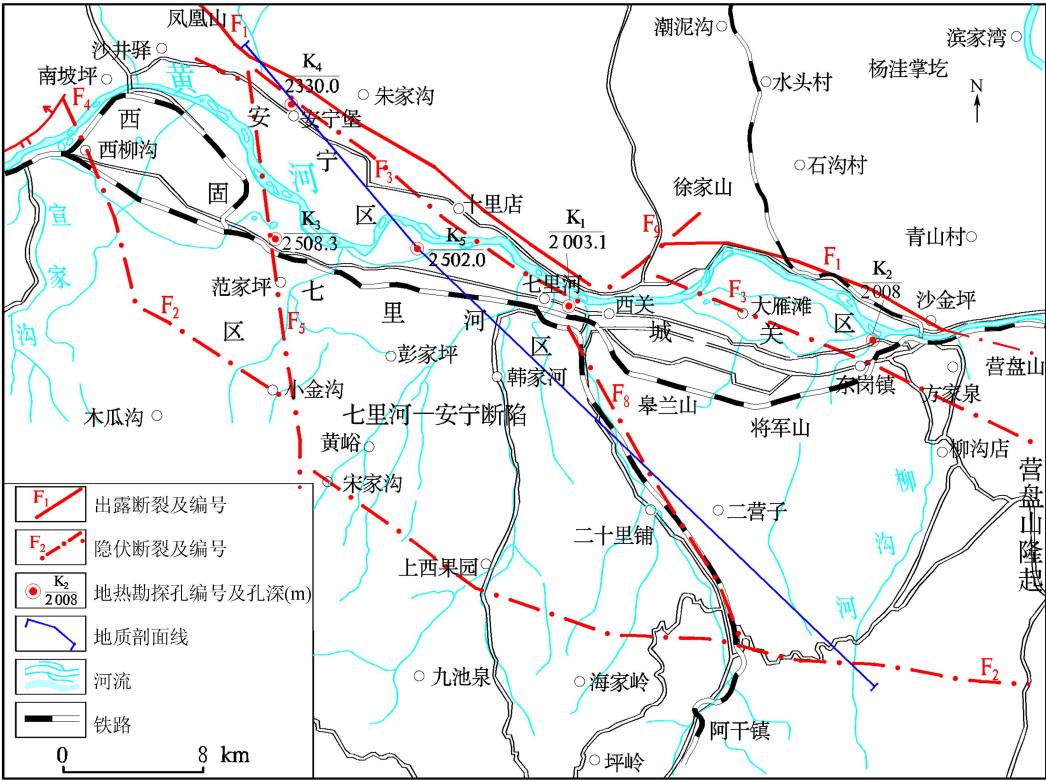


图 2 研究区地质构造纲要
Fig. 2 Sketch of regional geological structure in the study area

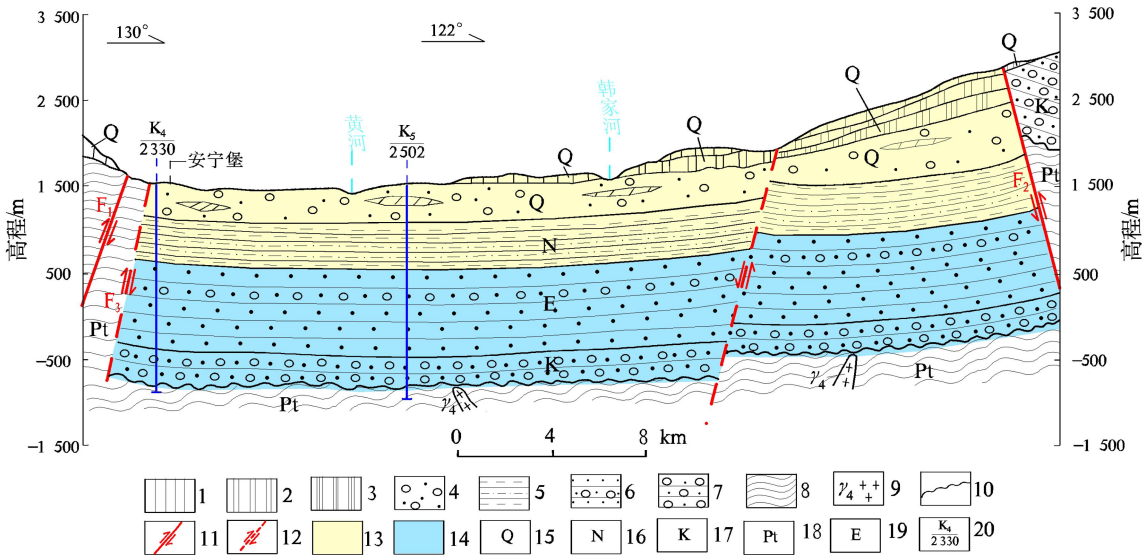
末期,进入第四纪后,新构造运动又在兰州断陷盆地中部发育形成了以 F_2 、 F_3 断裂为南、北边界, F_8 、 F_5 断裂为东、西边界,形似菱状的次级隐伏构造单元,即七里河—安宁断陷该断陷面积近 300 km^2 ,第四系厚度 $260\sim360\text{ m}$ 。这些基底断裂具有继承性活动的特点,一方面成为主要的地热流体通道,另一方面为深部地热流体循环创造了条件,以致不同深度的热储层形成热交换。沿断裂带附近热水孔水质矿化度较远离断裂带要低,证实断裂带具有良好的导热、导水作用^[3-4]。

2.2 盖层

兰州断陷盆地内,中新世基底为元古宇变质岩系,其间又被花岗岩体穿插侵入。在基底之上沉积巨厚的且分布广泛的中新生界河湖相,中新世厚度达 $1\,000\sim3\,000\text{ m}$ 。经不同位置地质钻探验证,区内自上而下发育有第四系(Q)、新近系(N)、古近系(E)、白垩系(K)和元古宇(Pt)。根据 300 m 以浅热响应钻孔证实,区内表部第四系结构松散,加之厚度较薄和含水,热导率较高,保温性较弱。而第四系下伏的新近系(N)泥岩、砂质泥岩层位在区域上分布稳定,总厚度达到 $1\,000\sim1\,200\text{ m}$,能够起到相对隔水、隔热保温的作用,形成较理想的深部地热流体保温层。据此,埋藏厚度 $800\sim1\,100\text{ m}$ 的新近系泥岩和砂质泥岩为本区热储盖层。

2.3 热储层

通过钻探确认,兰州断陷盆地内层状热储发育,以古近系(E)和白垩系(K)为主要热储层,热储埋藏深度为 $1\,000\sim1\,200\text{ m}$,厚度 $800\sim1\,600\text{ m}$,各套地层岩性均具明显的沉积旋回。构成层间地热流体层的含砾粗砂岩、砂砾岩、砂岩与泥岩互层,总体厚度上砂岩占比较大。兰州市城区热储含水层为古近系(E)、白垩系(K)砂岩、砂砾岩,累积厚度达 $500\sim800\text{ m}$ 。这些层状分布的地热流体含水层在城区普遍具有承压性,水头高度与钻孔深度和开采层位有关, $2\,000\text{ m}$ 左右深的地热孔,水头超出地面高度小于 10 m ,单井涌水量较小且水温偏低;而深度较大且揭穿或基本揭穿上热储含水层的钻孔,水头高出地面 $20\sim30\text{ m}$,单井涌水量大且出口水温高。如位于城区中心的天庆国际新城地热井(K_3)、仁寿山地热井(K_4)、秀川地热井(K_5),实测水头高度 $18.1\sim31.2\text{ m}$,单井涌水量 $63.8\sim90.0\text{ m}^3/\text{h}$,井口水温 $71\sim74\text{ }^\circ\text{C}$ 。此外,断裂对地热流体的疏通作用较大,沿断裂带分布的 K_3 、 K_4 地热孔地热水单井出水量、水温等明显优于其他位置的钻孔。上述不同时代热储均表现出孔隙—裂隙传导的特点。基底元古宇变质岩风化带热储据本次勘查钻探揭露厚度较薄且分布不稳定,因工作程度较低,有待进一步研究^[4](图3)。



1. 马兰黄土; 2. 离石黄土; 3. 午城黄土; 4. 砾卵石夹粉土透镜体; 5. 泥岩夹砂质泥岩; 6. 砂岩夹砂砾岩; 7. 砂砾岩; 8. 片岩; 9. 花岗岩; 10. 地层不整合线; 11. 实测断层; 12. 隐伏断层; 13. 盖层; 14. 热储; 15. 第四系; 16. 新近系; 17. 白垩系; 18. 元古宇; 19. 古近系; 20. 地热勘探孔编号及孔深(m)

图3 兰州断陷盆地地热地质剖面

万方数据

Fig.3 Geothermal geological section of Lanzhou faulted basin

2.4 地热源及传导

兰州断陷盆地地热资源属中低温($60\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 90\text{ }^{\circ}\text{C}$)沉积盆地型水热资源。根据钻孔测温和水样、岩样测试资料,除主要依赖正常或偏高的区域大地热流供给外,还有一定的放射性元素衰变产生的热量。

据钻孔测温资料显示,城区地温梯度一般为 $3.56\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,深度 $1\text{ }000\text{ m}$ 时地温一般 $45\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如 K_1 孔在 $2\text{ }000\text{ m}$ 深处地温为 $61\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均地温梯度 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; K_4 孔在 $2\text{ }300\text{ m}$ 深处地温为 $73\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均地温梯度 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (图4)。

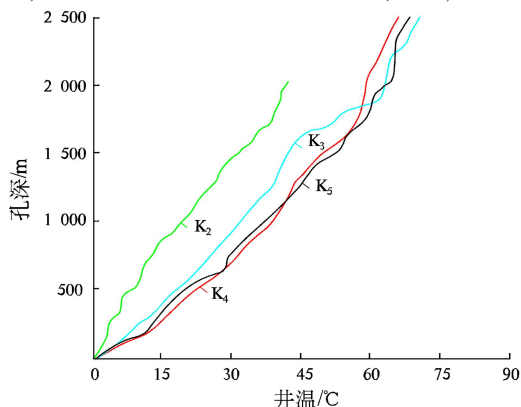


图4 各地热孔井温与深度关系

Fig.4 Relation between temperature and depth of geothermal wells in different places

由于测温时未达到最终平衡,实际地温应高于测温结果。根据钻进过程中对泥浆循环液温度的观测发现,温度与相应钻孔深度并不是线性增加,除其他因素外还与钻遇岩性有关,如 K_1 孔在 $1\text{ }000\sim 1\text{ }500\text{ m}$ 深度段,钻遇岩性以泥岩为主,钻井泥浆循环液温度一直保持在 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$;但在 $1\text{ }500\sim 2\text{ }000\text{ m}$ 深度段,钻遇岩性以砂岩、砂砾岩为主, $2\text{ }000\text{ m}$ 深度的钻井泥浆循环液温度却提高到 $52\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度增加 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此反映出细颗粒地层导热性差,粗颗粒地层导热性好的特点(图5)。

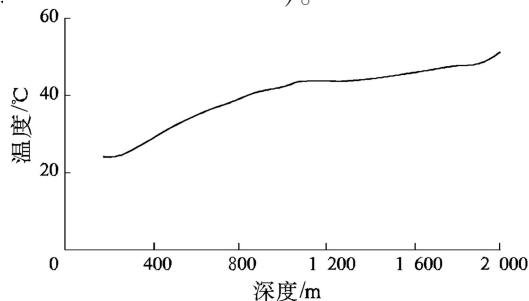


图5 K_1 地热孔钻井泥浆循环液温度与深度关系

Fig.5 Relation between temperature and depth of circulating drilling fluid of K_1 geothermal well

需说明的是,在实际钻探过程中岩性致密的地层对泥浆温度的提升小,反之,则对泥浆温度提升大。但同时也从实测井温曲线注意到(图4),渗透性差的地层增温率往往高于渗透性好的地层。由于元古宇中花岗岩脉或深部岩体的存在,地热水和岩芯所含放射性物质较高,由此判断热源中还存在放射性元素衰变产生的热量。

前述的保温及热源条件使深部碎屑岩类孔隙裂隙水随着深度增加地温梯度增大。而地热传导首先是盖层及热储所夹黏土岩热导率低产生的阻热效应使得深部热流热储中快速聚集、温度升高;其次是局部沟通热源的基底断裂带进一步增强了对下部地热流体向上部传输。本次物探在对区域主干断裂探查的同时,也发现了许多纵横交错的小规模次生断裂。研究认为,地热流体主要通过深大断裂带向上运移中通过与之相连的次级断裂向周边传导,从而在城区形成一个相当规模的热流网络区域^[3]。这种主次并存的相互连接关系加速了地壳深部热能向上运移和向周围扩散,也使得碎屑岩热储及盖层从下向上地温增加,由此形成高温高产和压力稳定的复合型热储,构成了区域性的地热水循环系统^[5]。

3 地球物理特征

兰州断陷盆地第四系、新近系、古近系、白垩系分布广,地球物理特征各异。表层第四系的岩性变化较大,电性变化也很大,电阻率为中高阻($40\sim 1\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$);中部新近系、古近系为低阻电性层($10\sim 30\text{ }\Omega\cdot\text{m}$),与下部白垩系构成不易区分的电性层,重力密度差($0.2\times 10^3\sim 1.0\times 10^3\text{ kg/m}^3$)微小;元古宇基底岩层电阻率较高($>100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$),与中新生界有明显的电性界面和 $0.25\times 10^3\text{ kg/m}^3$ 重力密度差。同时中新生界磁性较弱,元古宇磁性较高,这也是兰州盆地基底岩性划分的依据^[3]。本次物探方法的应用中,采用可控源音频大地电磁测深和重力勘探等物探手段刻画了兰州断陷中生界基底平面形态和范围,反映出基底形态中部下凹、由西向东平缓抬升的规律,最深处在西固区陈官营—深沟桥一带,埋深大约 $2\text{ }800\text{ m}$,同时推断划分出了多组规模较大的隐伏断裂(图6)。

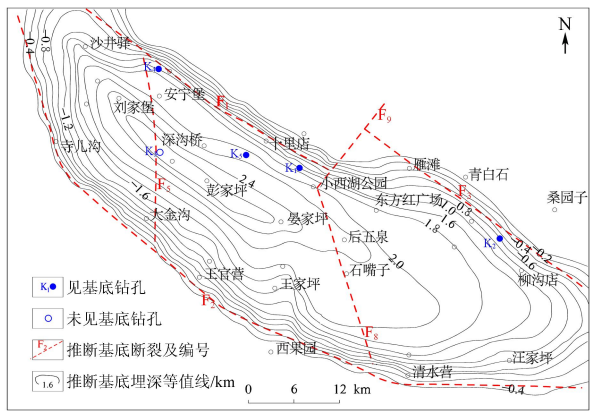


图6 重力物探推断兰州断陷盆地构造和基底埋深等值线
Fig.6 Structure and contour of basement buried depth by gravity geophysical prospecting in Lanzhou faulted basin

4 地下热水形成

兰州断陷盆地南部山区基岩裸露,岩石构造裂隙发育,降水及其汇集而成的地表径流沿断裂带或岩层间裂隙向地下渗入进入热储层。盆地中巨厚的中新世沉积物构成了补给—径流—排泄条件完整的碎屑岩类孔隙裂隙承压自流水含水层系统^[7]。在漫长的地质年代里,地下水在径流过程中经深循环岩温加热而形成深层热水,水温随热储层埋深增加逐渐增高。还有斜切黄河河谷的断裂破碎带,加剧了深层地热流体的水交替作用。根据水头标高等值线图推测,地热水在向北、北东方向径流中,于城区东部的桑园峡一带受阻溢出地面排入黄河。现状人工排泄地热水量很小^[3]。

5 地热水水化学

兰州断陷盆地属半封闭的中新世地下水自流盆地,地下径流滞缓。中粗、细砂岩为地热流体层,水化学类型为 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 型和 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 型,水质矿化度介于4.6~20 g/L之间,属高矿化的地热水。地下热水含有丰富的矿物质,除常规离子外,还有氟、溴、碘、锶、锂、偏硼酸、偏硅酸等多种有益元素,其中K₃孔水中含氟(0.94 mg/L)、溴(13.80 mg/L)、碘(0.78 mg/L)、锶(35.71 mg/L)、锂(0.976 mg/L)、偏硼酸(16.96 mg/L)、偏硅酸(53.56 mg/L),多项指标达到有医疗价值的浓度,为极佳的医疗矿泉水。

6 开发潜力分析

地热资源是一项地球内部自然赋存的一定深度范围内可供开发利用的无污染新能源,由于地热地质条件的变化,热储类型和地热水特征又存在着明显的差异^[3]。目前,兰州市城区地热勘探程度仍然较低,仅达到调查—普查阶段,还未从区域层面形成对深层地下热水资源的合理控制,也无法较准确地评价其可利用资源量。依据兰州市城区地热资源勘查获取的资料,以研究程度较高的七里河—安宁断陷为依托,根据整个城区地热水赋存条件相似的特点,采用水文地质学方法和热储法,分西部城区、中部城区(七里河—安宁断陷)和东部城区对地热水资源开发潜力进行了分析评价。

经水文地质方法计算,西部城区、中部城区(七里河—安宁断陷)、东城区相应地热流体允许开采量分别为200.0 m³/h、1 000.0 m³/h、275.0 m³/h;利用断面径流法复核,以上区段地热流体允许开采量有较高的保证程度。

从热量角度分析,西部城区、中部城区(七里河—安宁断陷)、东城区对应热储中储存热量分别为1.81×10²¹ J、1.11×10²² J和5.09×10²⁰ J;可采出的热量转换成热功率分别是23.49 MW、117.46 MW和17.91 MW。开采100 a能采出的热量分别为6.19×10¹⁶ J、3.10×10¹⁷ J和4.72×10¹⁶ J,只占各热储中储存热能的0.034%、0.028%和0.009%。初步评价西部城区、中部城区(七里河—安宁断陷)、东城区地热田的产能分别为23.49 MW、117.46 MW和17.91 MW,3处地热田规模分别达到中型、大型和中型。

通过对地热流体质量评价,兰州市城区地下热水属中性、中低温热水,地热水中含有多种微量组分具有较高的理疗价值,达到国家理疗热矿水水质标准,主要可用于采暖、洗浴、养殖、温室等。

由此可见,兰州市城区地热资源潜力大,开采条件适宜,利用前景良好,在采取科学合理的资源保护和环境保护措施后,能够满足较大规模的建筑供暖及其他用途的开发利用^[6]。

7 结论

(1)兰州断陷盆地属中生代断陷盆地,盆地内

断裂发育并具有继承性活动的特点,形成了以盆地传导型兼断裂对流型地热地质条件。

(2) 水热型地热资源分布范围大,以古近系(E)、白垩系(K)碎屑岩及元古宇(Pt)基底片岩风化带组成热储,厚度达到 800 ~ 1 600 m; 盖层以新近系(N)泥岩、砂质泥岩为主,层位稳定,厚度为 1 000 ~ 1 200 m。

(3) 通过现阶段勘探表明,城区一带深部赋存的地热流体普遍存在承压性,单井涌水量 20.8 ~ 90.0 m³/h,出口水温 42 ~ 74 ℃,属中低温、高矿化地热水。初步评价西部城区、中部城区(七里河—安宁断陷)、东部城区 3 处地热田产能分别为 23.49 MW、117.46 MW 和 17.91 MW,规模达到中—大型地热田。

参考文献:

- [1] 周阳,邓念东,王凤,等. 浅层地热能适宜性分区结构的分形原理[J]. 中国地质调查,2017,4(1):18-23.
- [2] 白福,马根喜. 兰州地热资源赋存特征浅析[J]. 水文地质工程地质,2005,32(6):3-5.
- [3] 魏林森,张凌鹏,王婷,等. 甘肃省兰州市城区地热资源勘查报告[R]. 兰州:甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院,2016.
- [4] 王佟,王莹. 陕西渭河盆地地热资源赋存特征研究[J]. 西安科技学院学报,2004,24(1):82-85.
- [5] 董忠萍. 河西走廊地下热水资源成因分析[J]. 资源环境与工程,2013,27(4):455-460.
- [6] 周总瑛,刘世良,刘金侠. 中国地热资源特点与发展对策[J]. 自然资源学报,2015,30(7):1210-1221.
- [7] 牛树银,孙爱群,李红阳. 华北地区地热特征及其成因机制[J]. 地学前缘,2001,8(1):112.

Analysis of geothermal geological conditions and resources exploitation potential in Lanzhou City

WEI Linsen, ZHANG Linpeng, WANG Ting, LI Li

(The Second Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resource, Lanzhou, 730020 China)

Abstract: Lanzhou City is located in Mesozoic faulted basin of the eastern Minhe - Lanzhou depression basin. Due to the thick sedimentary rocks and the well developed faults from multi -period tectonic movements in the basin, this area is in favorable condition for geothermal water formation. Through exploration confirmation, the geothermal resources of Lanzhou City are the sedimentary basin type of middle - low temperature (60 to 90 ℃). The distribution of the geothermal resources of about 530 km² is mainly controlled by two deep faults in the north and south of the basin. According to the partition of the geological structure units, the authors have evaluated geothermal resources exploitation potential of the three blocks in the east, the middle and the west of the city. The results show that the productivities of the geothermal fields in the three blocks are 17.91 MW, 117.46 MW and 23.49 MW respectively. So these fields can be regarded as the middle - large scale geothermal fields, with better prospects for development and utilization.

Key words: geothermal water resources; geological conditions; Lanzhou City

(责任编辑: 常艳)