

doi: 10.12029/gc20220603

李胜涛,岳冬冬,冯昭龙,宋健,刘东林,宋志彬,和国磊,龙慧,郝文杰,张秋霞. 2022. 天津东丽湖深部岩溶热储探测与储层参数研究及其开发利用潜力分析[J]. 中国地质, 49(6): 1732-1746.

Li Shengtao, Yue Dongdong, Feng Zhaolong, Song Jian, Liu Donglin, Song Zhibin, He Guolei, Long Hui, Hao Wenjie, Zhang Qiuxia. 2022. Sinoprobe and parameters study on deep karst geothermal reservoir in the Donglihu Area, Tianjin and its exploitable potential analysis[J]. Geology in China, 49(6): 1732-1746(in Chinese with English abstract).

天津东丽湖深部岩溶热储探测与储层参数研究及其开发利用潜力分析

李胜涛^{1,2,3}, 岳冬冬¹, 冯昭龙¹, 宋健¹, 刘东林¹, 宋志彬⁴,
和国磊⁴, 龙慧¹, 郝文杰^{1,2}, 张秋霞¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051; 2. 自然资源部地质环境监测工程技术创新中心, 河北保定 071051; 3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 4. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林长春 130026)

摘要:【研究目的】天津市地热资源储量丰富、开发利用程度高,蓟县系雾迷山组三、四段白云岩热储是目前的主力开采层位,随着开发强度不断增大,部分地区开采潜力已达极限。探测深部地热资源、增加可开采资源量,成为保障天津地区地热可持续发展的有效途径之一。【研究方法】本次研究以东丽湖为重点研究区,开展深部热储地球物理探测,实施地热科学钻探 CGSD-01 井。【研究结果】主要结果包括:(1)CGSD-01 井在 3715 m 钻遇雾迷山组二段,上覆雾迷山组三段底部发育一套紫红色泥质白云岩夹浅灰色细晶白云岩,厚度约 73 m,裂隙不发育,具有隔水-弱透水性; (2)CGSD-01 井成井深度 4051.68 m,孔底温度 105 °C,单位涌水量 1.53 m³/h·m,渗透系数 0.40 m/d,导水系数 48.69 m²/d; (3)雾迷山组二段地热水类型为 Cl⁻·SO₄²⁻·HCO₃⁻-Na 型,矿化度 1.7 g/L,初步推断地热水来源于大气降水,主要发生混合、阳离子交替吸附、碳酸盐岩溶解、硫酸盐还原等作用,且未达到平衡; (4)蓟县系雾迷山组二段单井最大涌水量可达 130 m³/h,出水温度 100 °C,单井可满足约 30 万 m² 建筑物供暖需求。【结论】在天津地区深部热储第二空间首次探获高产能雾迷山组二段新储层,探明了热储结构和主要参数,显示出良好的资源前景。

关键词: 地热; 碳酸盐岩热储; 高产能地热井; 热储参数; 深部热储探测; 地热地质调查工程; 东丽湖; 天津

创新点: 本文基于地质综合分析,采用地球物理、地热钻探、地球物理测井和热储试验相结合的方法开展雾迷山二段热储研究,有助于指导深部热储勘查。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-1732-15

Sinoprobe and parameters study on deep karst geothermal reservoir in the Donglihu Area, Tianjin and its exploitable potential analysis

LI Shengtao^{1,2,3}, YUE Dongdong¹, FENG Zhaolong¹, SONG Jian¹, LIU Donglin¹,
SONG Zhibin⁴, HE Guolei⁴, LONG Hui¹, HAO Wenjie^{1,2}, ZHANG Qiuxia¹

收稿日期: 2020-05-18; 改回日期: 2020-06-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0604305)及中国地质调查局项目(DD20190127, DD20179621, DD20221680)联合资助。

作者简介: 李胜涛,男,1982年生,博士生,正高级工程师,研究方向为水工环地质、地热地质、热储工程; E-mail: list07@mails.jlu.edu.cn。

通讯作者: 刘东林,男,1985年生,硕士,高级工程师,研究方向为地下水科学与工程、热储工程; E-mail: liudonglin967@126.com。

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geology Survey, Baoding 071051, Hebei, China; 2. Geological Environment Monitoring Engineering Technology Innovation Center of the Ministry of Natural Resources, Baoding 071051, Hebei, China; 3. Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geosciences, Langfang 065000, Hebei, China; 4. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal resource survey engineering.

[Objective] Tianjin is abundant in geothermal resources with high utilization level, and section 4-3 in Wumishan Formation of Jixian system is the main development dolomite reservoir at present. With the development intensity of geothermal fluid increasing, the exploitation potential of some areas has reached the limit. Exploring the deep geothermal resources and increasing the allowable productions have become one of the effective ways to ensure the sustainable development of geothermal resources in Tianjin. **[Methods]** Donglihu area is the key research region in this study. Deep geophysical detection had been carried out and geothermal scientific exploration well CGSD-01 had been drilled. **[Results]** The main results are listed as follows: (1) CGSD-01 drilling encountered the section 2 of Wumishan Formation at 3715 m, a set of purplish red argillaceous dolomite with light gray fine-grained dolomite is developed at the bottom of the section 3 of Wumishan Formation overlying, the thickness is about 73 m, and the fissures are not developed, which can be considered as aquiclude or aquitard; (2) The completion depth of CGSD-01 is 4051.68 m, and the bottom temperature is 106°C, specific field is 1.53 m³/h·m, permeability is 0.40 m/d, conductivity is 48.69 m²/d; (3) The geothermal fluid type of the section 2 of Wumishan Formation is Cl·SO₄·HCO₃-Na, salinity is 1.7 g/L. It is preliminarily inferred that the geothermal water is originated from atmospheric precipitation, and mainly occurs mixing, cation alternating adsorption, carbonate dissolution, sulfate reduction, and does not reach equilibrium state; (4) The maximum outflow rate of CGSD-01 can be reach to 130 m³/h, and the temperature is 100°C, which can meet the heating load of 300 thousand square meters building area. **[Conclusions]** The high-yield new reservoir section 2 in Wumishan Formation of Jixian system was exposed for the first time in the second space of deep thermal reservoir in Tianjin area, and the thermal reservoir structure and main parameters of the reservoir were proved up, showing a good resource prospect.

Key words: geothermal; carbonate thermal reservoir; high yield geothermal well; deep geothermal reservoir detection; geothermal reservoir parameter; geothermal resource survey engineering; Donglihu; Tianjin

Highlights: Based on the comprehensive geological analysis, this paper carries out the research on the section 2 in Wumishan reservoir by combining the methods of geophysics, geothermal drilling, geophysical logging and pumping test, which is helpful to guide the deep reservoir exploration.

About the first author: LI Shengtao, male, born in 1982, doctor candidate, professor level senior engineer, engaged in the research of hydrogeology, geothermal geology, and thermal storage engineering; E-mail: list07@mails.jlu.edu.cn.

About the corresponding author: LIU Donglin, male, born in 1985, master, senior engineer, engaged in the research of groundwater science and engineering, thermal storage engineering; E-mail: liudonglin967@126.com.

Fund support: Supported by the National Key Research and Development Program (No.2018YFC0604305) and the projects of China Geological Survey (No.DD20190127, No.DD20179621, No.DD20221680).

1 引言

在资源枯竭、经济发展和环境保护的三重压力下,寻找并开发利用新型清洁能源是关系国计民生和社会可持续发展的紧迫任务。推动绿色发展,构建清洁、安全、高效的能源体系已成为时代的要求。地热资源作为清洁能源的重要组成部分被寄予厚望。

天津市地热资源条件优越,地热开发利用水平一直处于全国前列。天津地热勘查研究工作开始

于20世纪70年代,李四光同志主导的天津地热会战掀起了全国地热勘查研究的第一个春天,并发现了新近系和奥陶系两个热储。80年代以来,在市政府和原地矿部的支持以及联合国开发计划署的援助下,地热勘查开始向深部基岩热储发展,先后完成王兰庄、山岭子、塘沽地区三个地热田的勘查工作。自此之后,天津的地热研究与开发工作一直处于中国前列。先后发现地热田8个,已发现两大类6个热储,即孔隙型热储(新近系明化镇组、馆陶组热储和古近系东营组)和裂隙溶隙型热储(奥陶系、寒

武系和蓟县系雾迷山组三、四段热储), 3000 m以浅年可开采地热流体为 $7606 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中, 蓟县系雾迷山组三、四段热储是天津地热开发的主力储层。随着开发强度不断增大, 部分地区开采潜力已达极限(天津地热勘查开发设计院, 2000; Wang, 2008; 王继革等, 2013)。

随着钻探技术的不断进步和清洁能源需求的持续增长, 向地球深部进军, 探测深部地热资源、开辟深部热储第二空间、增加可开采资源量, 成为保障天津地区地热可持续开发的有效途径之一。为此, 2017年以来, 中国地质调查局在天津东丽湖地区部署了深部地热探测工作, 并在主力储层下部探获雾迷山组二段高产能新储层。本文主要介绍天津东丽湖深部岩溶热储探测和高产能地热井参数研究取得的新成果、新进展。

2 研究区概况

2.1 地热地质背景

天津市地处 I 级构造单元华北地台北缘, 以宁河—宝坻断裂为界分为北部山区和南部平原区。其中, 南部平原区属 II 级构造单元华北断拗区, 是中、新生代断陷、拗陷盆地。区内 III 级构造单元包括一隆两拗即沧县隆起、冀中拗陷和黄骅拗陷。隆起和拗陷及其间分布的诸多 IV 级构造单元凸起、凹陷的延伸方向和较大断裂的走向均呈北北东(NNE)向, 形成雁行式相间排列的构造格局(陈墨香, 1988)(图1)。

宝坻—宁河断裂以南为天津南部平原区, 总面积 8700 km^2 , 地热资源条件优越。发育有王兰庄、山岭子、滨海、武清、潘庄—芦台、宁河—汉沽、万家码头和周良庄等 8 个地热田, 年可开采地热流体 $7606 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图2)。各地热田均位于华北断拗范围内, 地面均为第四系松散沉积物覆盖, 厚度可达数百米。其下是巨厚的新生界陆相碎屑岩沉积, 是一套半胶结的砂岩和泥岩地层, 沉积厚度在沧县隆起相对较薄, 在冀中拗陷和黄骅拗陷沉积较厚, 最大厚度可达近万米。在新生界的巨大不整合覆盖之下, 主要是古生界和中上元古界的基底地层, 在拗陷中还有局部中生界分布。区内地热资源主要赋存于两大类 6 个储层中: 一类为孔隙型热储, 包括新近系明化镇组、馆陶组和古近系东营组热储; 一类为裂隙溶

隙型热储, 包括奥陶系、寒武系和蓟县系雾迷山组热储(张百鸣等, 2006; Wang, 2008)(图3)。

东丽湖地区位于天津市东部, 隶属于天津市东丽区, 位于 IV 级构造单元潘庄凸起上, 发育有著名的山岭子地热田。依据研究区内地热井的钻探资料, 揭露的地层从新到老为: 新生界(第四系和新近系)、古生界(奥陶系和寒武系)、中新元古界(青白口系和蓟县系)(表1)。区内已发现新近系明化镇组、新近系馆陶组、奥陶系和蓟县系雾迷山组三、四段 4 个热储。其中, 雾迷山组三、四段为当前主力储层, 沧县隆起上钻孔揭露顶板埋深为 1752~2016 m, 揭露厚度为 480~1032 m, 单井出水量为 70~120 m^3/h , 最大可达 204 m^3/h , 出水温度为 88~102 $^{\circ}\text{C}$, 孔隙度 1%~5.8%, 渗透率 $5.52 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$ 或 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型, 总矿化度为 1670~2200 mg/L , 总硬度为 120~240 mg/L (以 CaCO_3 计), pH 值为 7.3~8.4(林黎等, 2007; 王继革等, 2013)。从区域地质资料看(高昌, 2003; 赵苏民等, 2006), 区内雾迷山组厚度约 3500 m, 岩石组合为一套富镁碳酸盐岩, 岩性主要为白云岩。燧石条带白云岩、硅质白云岩夹 2~5 层棕红、紫红色泥岩和页岩, 可作为雾迷山组三、四段和一、二段的分界线。从岩性组合的相似性可以推测, 雾迷山组一、二段可作为未来深部热储探测的重要方向, 也是本次研究的重点。

2.2 开发利用现状

天津地热资源开发利用水平在全国居于较高地位, 也是全国中低温地热直接利用规模最大的城市, 是全国第一批“中国温泉之都”。自 20 世纪 30 年代以来, 经过 80 多年的发展, 天津地热资源开发利用从浅到深、从无序到有序、从粗放到精细, 逐渐形成了规模化、产业化, 在中国地热勘查开发利用史上具有举足轻重的作用。截至 2017 年, 天津市共有地热开采井 466 眼, 年开采总量为 $5181.08 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中, 蓟县系雾迷山组三、四段约占开采总量的 54%。地热资源主要应用于供暖、洗浴、理疗、旅游、养殖等。其中, 供暖是最主要的利用方式, 占年总开采量的 81.5%。建有地热供暖小区及公建项目 496 个, 全市地热供暖总面积达 $3500 \times 10^4 \text{ m}^2$, 占全市集中供暖面积的 8%, 是中国利用水热型地热资源供暖规模最大的城市。

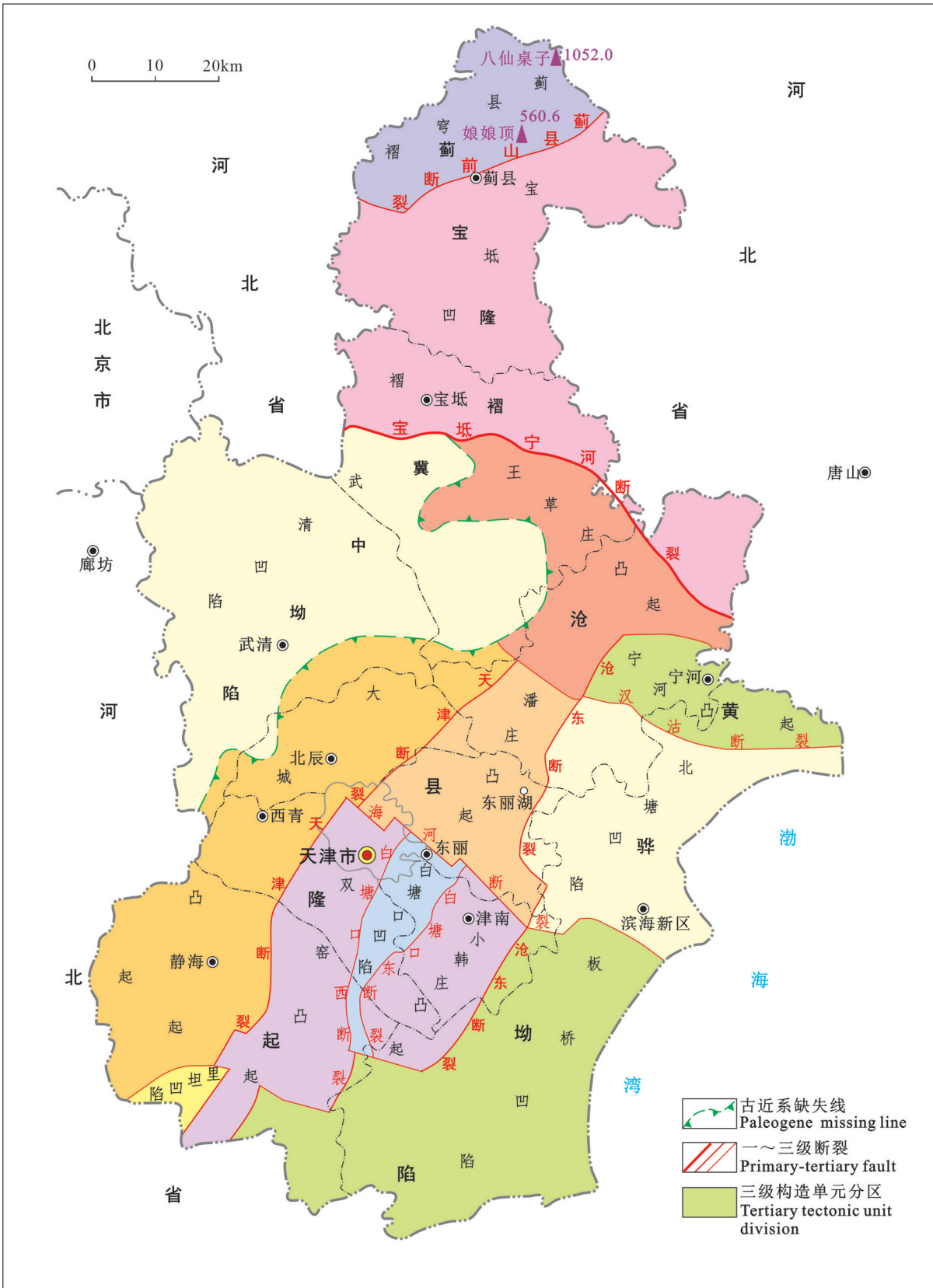


图1 天津市构造单元划分图
Fig.1 The division map of structural units of Tianjin

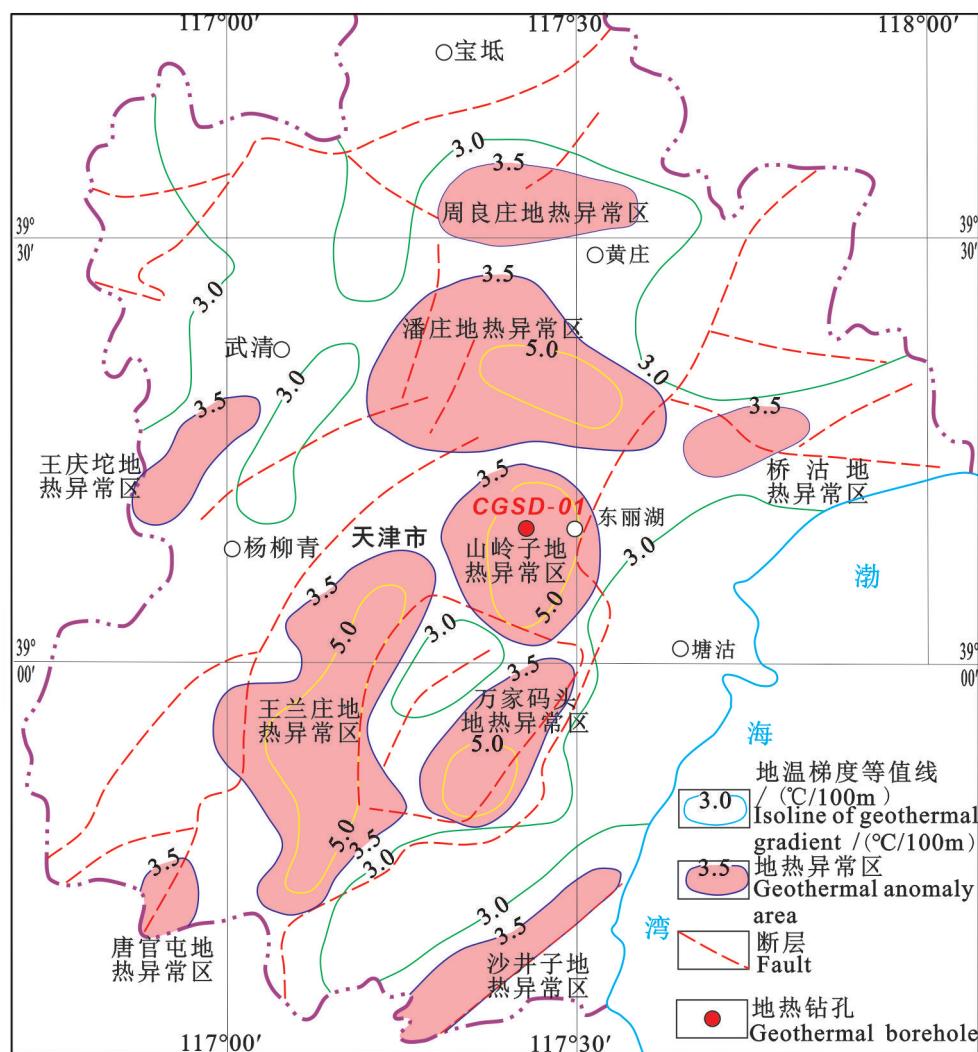


图2 天津市地热田分布图

Fig.2 The distribution map of geothermal field of Tianjin

东丽湖地区现有地热井34眼。其中,新近系明化镇组4眼,新近系馆陶组2眼,奥陶系3眼,蓟县系雾迷山组三、四段25眼。年开采地热流体约 $395.44 \times 10^4 \text{ m}^3$,采用梯级、综合利用和群井联动回灌的开发模式,达到资源的优化配置和实时调控,地热利用率和回灌率达到95%以上,实现了资源的统一规划、统一开发和统一管理。地热资源广泛应用于供暖、温泉洗浴、养生理疗、康乐旅游、矿泉水开发等领域,建有东丽湖温泉旅游度假区,在发展温泉旅游产业,促进地区经济发展,保护生态环境方面取得了显著的成效。2008年12月25日和2011年12月30日,分别被中国矿业联合会和国土资源部命名为“中国温泉之乡”。

3 深部热储探测方法

本次研究主要基于地质综合分析,采用地球物理探测、地热钻探、地球物理测井和热储试验相结合的方法开展探测研究。

3.1 地球物理探测

为满足深部储层探测需要,本次地球物理探测的主要目标确定为5 km以浅地层的结构探测,为地热钻探提供依据。由于探测深度大,且存在高压线、铁路等城市干扰源,本次地球物理探测采用了二维地震和时频电磁相结合的勘查方法,其中,时频电磁方法首次应用到地热勘查领域。时频电磁方法是通过大功率人工场源激发信号,测量研究区

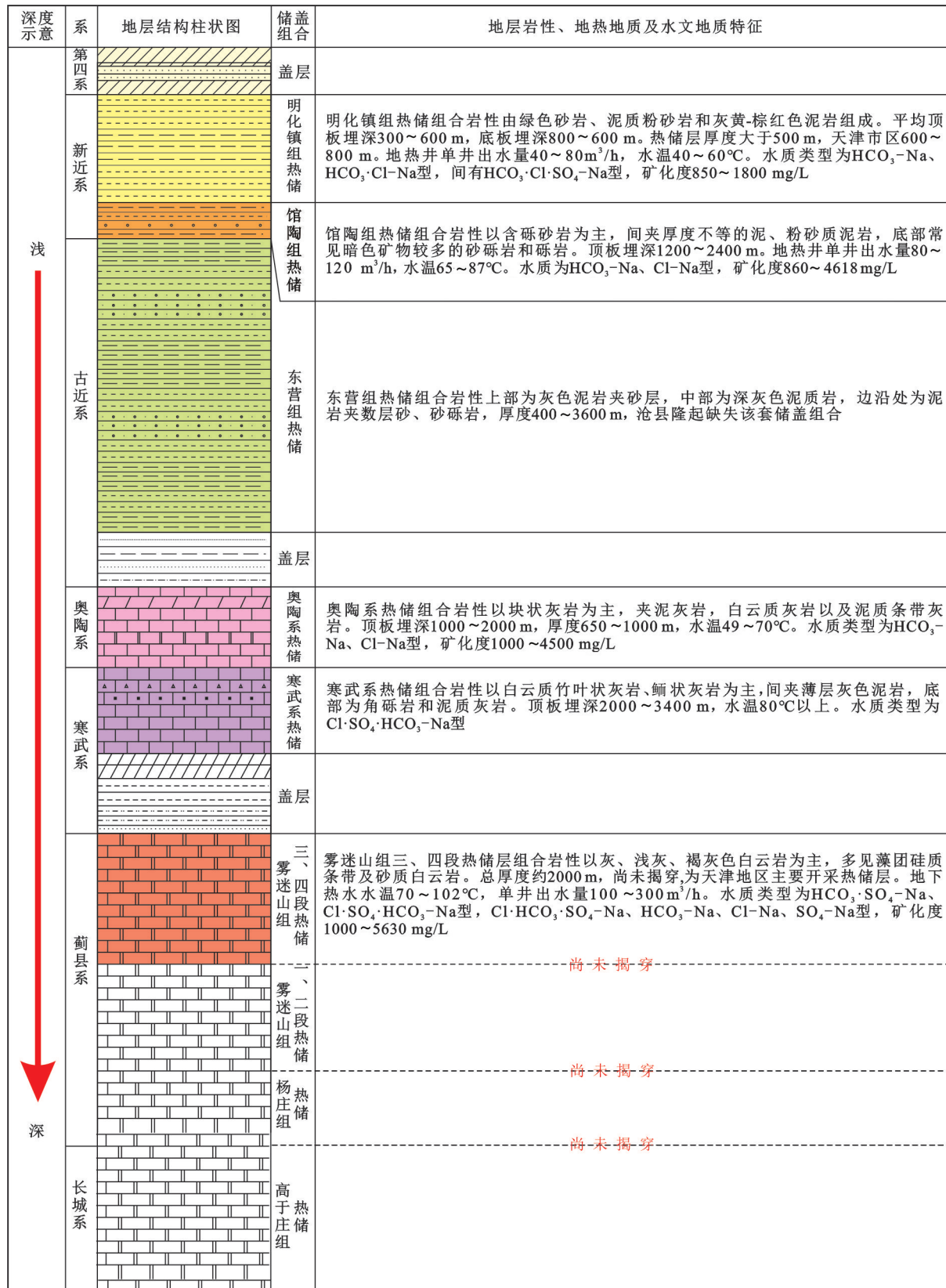


图3 天津市地热田主要热储及储盖结构
Fig.3 The vertical structure of geothermal reservoirs in Tianjin

表1 天津东丽湖地区综合地层简表
Table 1 The simplified table of geological strata in Donglihu area, Tianjin

界	地层			地层厚度/m	岩性特征
	系	组	段		
新生界(Cz)	第四系(Q)			350~500	黏土、粉细砂互层
	新近系(N)	明化镇组(Nm)	上段	400	砂岩为主,与泥岩互层
			下段	500	泥岩为主,与砂岩互层
		馆陶组(Ng)		0~100	砂砾岩
	古生界(Pz)	奥陶系(O)	马家沟组(Om)		514
亮甲山组(Ol)				99	灰岩
冶里组(Oy)				101	灰岩
寒武系(C)		张夏组(Cz)		0~100	鲕粒灰岩
		馒头组(Cm)		0~200	上段泥页岩,中下段白云岩、灰岩为主
中、新元古界(Pt)	青白口系(Qb)	昌平组(Cch)		0~100	白云质灰岩
		景儿峪组(Qnj)		150~250	泥灰岩、灰岩
	蓟县系(Jx)	龙山组(Qnl)		50~150	砂岩、泥页岩
		雾迷山组(Jxw)	四段	827	白云岩
			三段	963	白云岩夹泥岩
二段			983	白云岩	
一段	643		白云岩		

测线的电磁场分量,分析频率域信号的振幅和相位特征,来获得介质的地电参数(电阻率和极化率),把信号转换到时间域,建立高分辨的电法勘探的时间断面。较传统电磁方法,在应对强电磁干扰方面具有一定的优势(Dong et al., 2008; 周印明等, 2013, 2015)。

本次工作部署时频电磁法完成测线4条,剖面24.4 km,点距200 m,物理点128个;二维地震完成剖面3条,8.25 km,测点254个(图4)。

地球物理探测结果初步揭示了天津东丽湖地区雾迷山组二段的分布。从TFEM-1测线地质剖面解译图(图5)可以看出,F1沧东断裂西侧,电阻率异常特征从上至下依次为“低—高一低—高一高—高”,表层低阻和浅层高、低阻分别是第四系、新近系明化镇组与馆陶组地层响应特征,电阻率过渡连续,无明显的错断。第二套高阻层为寒武系(C)与青白口系(Qb)的反映,深部的次高阻为蓟县系雾迷山组4段(Jxw₄)的反映,深部的高阻为蓟县系雾迷山组2、3段(Jxw₂₋₃)的反映。蓟县系雾迷山组四段埋深2300~3000 m,下部发育雾迷山组二段和三段地层,埋深在3000 m以下。因缺乏雾迷山组二、三段电性参数,不易进一步细分。从二维地震DZ01剖面解释图(图6)可以看出,区内4000 m以浅

揭示的地层分别为第四系、新近系明化镇组、新近系馆陶组、寒武系、青白口系和蓟县系雾迷山组。新近系馆陶组底界以上主要标准反射界面清晰可辨,以下反射界面呈断续分布。推测第四系底界埋深341~363 m;新近系明化镇组底界埋深1123~1160 m,馆陶组底界埋深1347~1500 m;寒武系张夏组底界埋深1758~2033 m,馒头组底界埋深1786~2113 m,昌平组底界埋深1856~2164 m;青白口系底界埋深2196~2444 m;蓟县系雾迷山组四段底界埋深2802~3004 m,三段底界二段顶界埋深3552~3726 m。4000 m探测深度范围内未揭示蓟县系雾迷山组底界。

3.2 地热科学钻探

在天津东丽湖部署地热科学钻探CGSD-01井,目标层位为蓟县系雾迷山组二段。2017年11月20日开钻,2018年11月19日完钻。成井深度4051.68 m,3715 m进入雾迷山组二段储层,是当时天津最深的地热井。

该井井身结构为三开直井。其中,护壁段(0~76 m)采用Φ660.4 mm冲击钻钻头施工,下入Φ508 mm×8.0 mm无缝套管,总长度为74.42 m。一开井段(76~1469.53 m)采用Φ444.5 mm牙轮钻头钻进,入Φ339.7 mm×J55钢级套管,长度1469.84 m。二

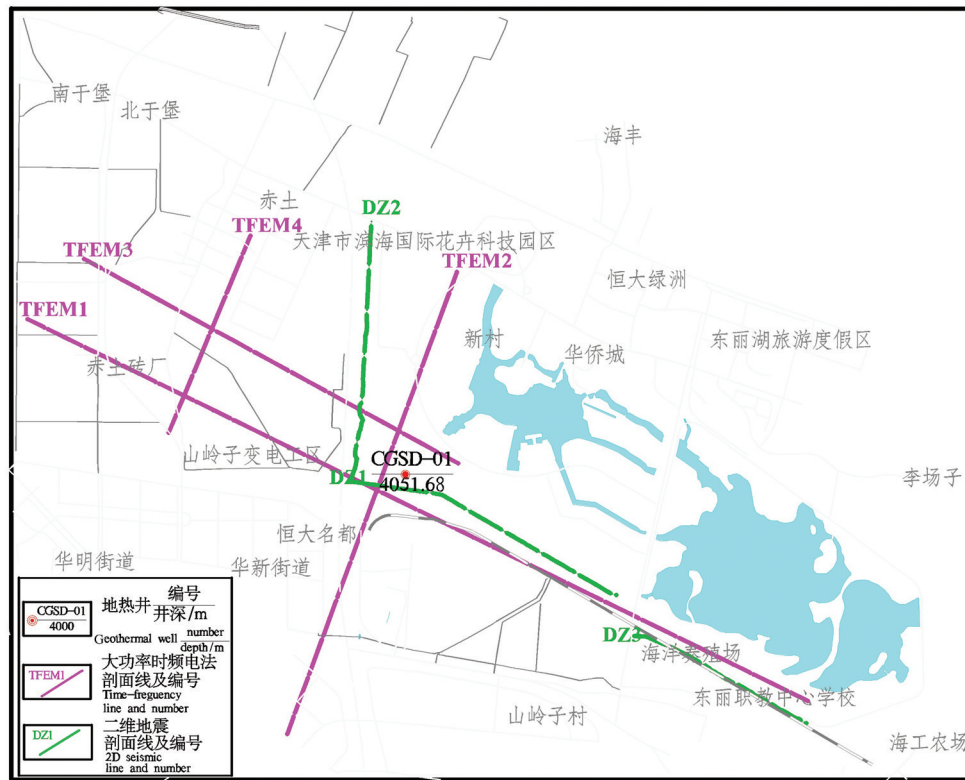


图4 二维地震与时频电磁法工作部署图

Fig.4 Location of seismic and time-frequency electromagnetic survey sections

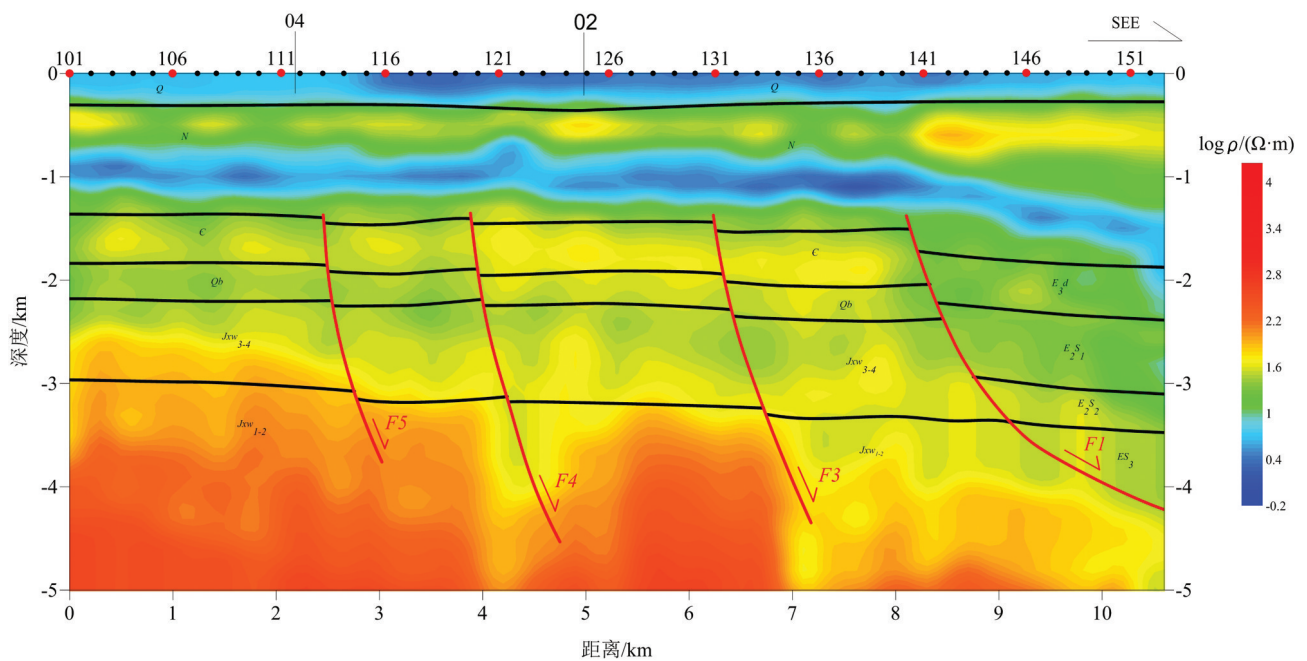


图5 TFEM 1测线时频电磁二维反演电阻率剖面图

Fig.5 Time-frequency electromagnetic method profile in the line TFEM 1

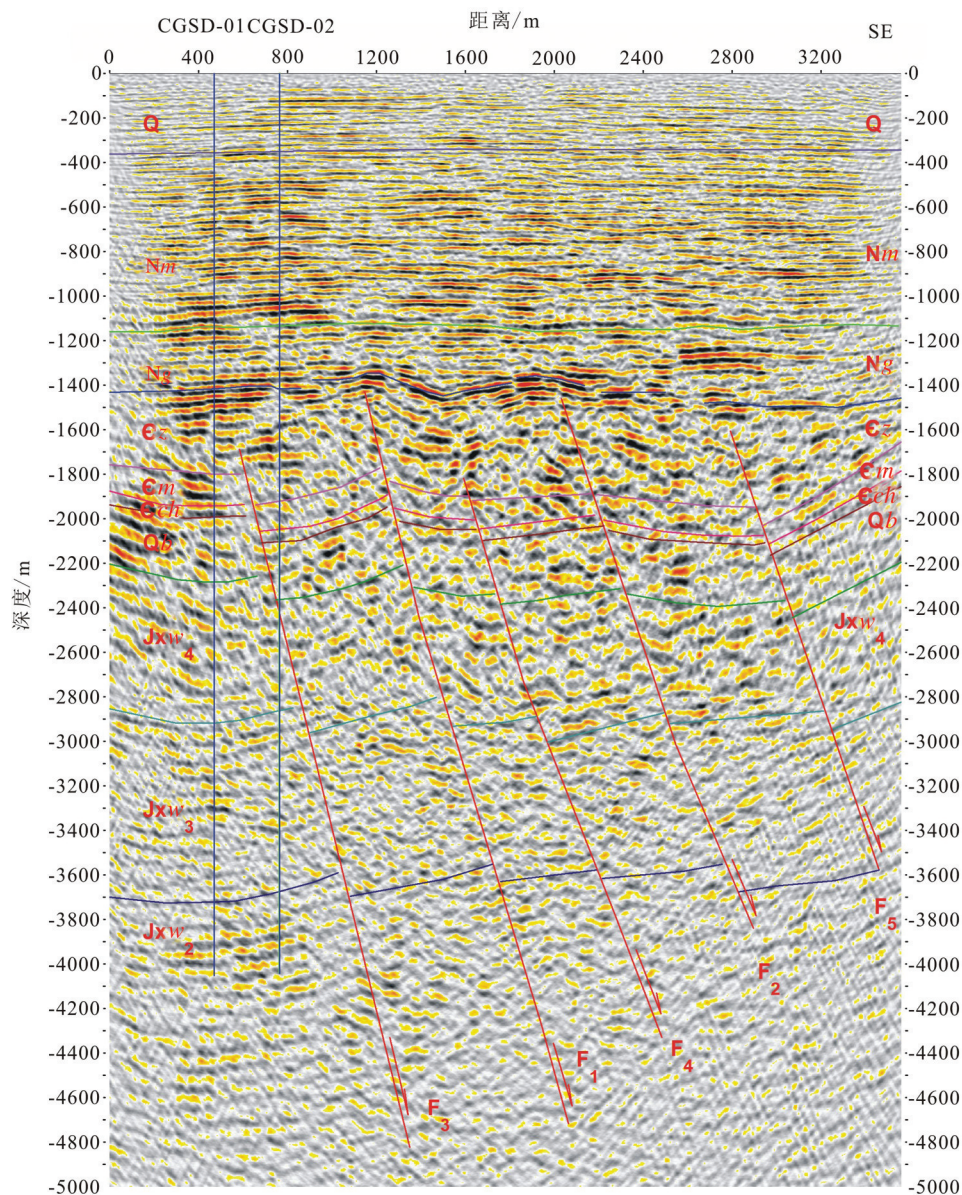


图6 二维地震剖面DZ01剖面图

Fig.6 The 2D seismic profile in the DZ01 section

开井段(1469.53~2262.75 m)采用 $\Phi 311.2$ mm牙轮钻头钻进,下入 $\Phi 244.5$ mm \times 10.03 mm N80钢级套管,长度866.60 m,与一开套管重叠68.12 m。三开井段(2262.75~4051.68 m)采用 $\Phi 215.9$ mm牙轮钻头钻进,下入 $\Phi 177.8$ mm \times 9.19 mm N80钢级套管,长度1939.96 m,其中实管长度为1747.23 m,花管长度为192.73 m,与二开套管重叠151.03 m。钻进过程中,开展了岩屑和岩心采集工作。1500 m以浅每5 m捞取岩屑一次,1500 m以深每2 m捞取岩屑一次,全井共计捞取岩屑样1873个。500~4051.68 m

井段采取定深分段采取岩心,累计取心37回次,进尺161.25 m,长度140.78 m,采取率85%。

3.3 地球物理测井

钻井过程中,对地热井开展了综合地球物理测井工作,主要包括温度测井、压力测井、井径测井、井斜测井、视电阻率测井、双感应测井、自然电位测井、自然伽马测井、声波测井、伽马-伽马测井和流体流量测井11项。

3.4 热储试验

钻探完成后,为获取蓟县系雾迷山组二段新储

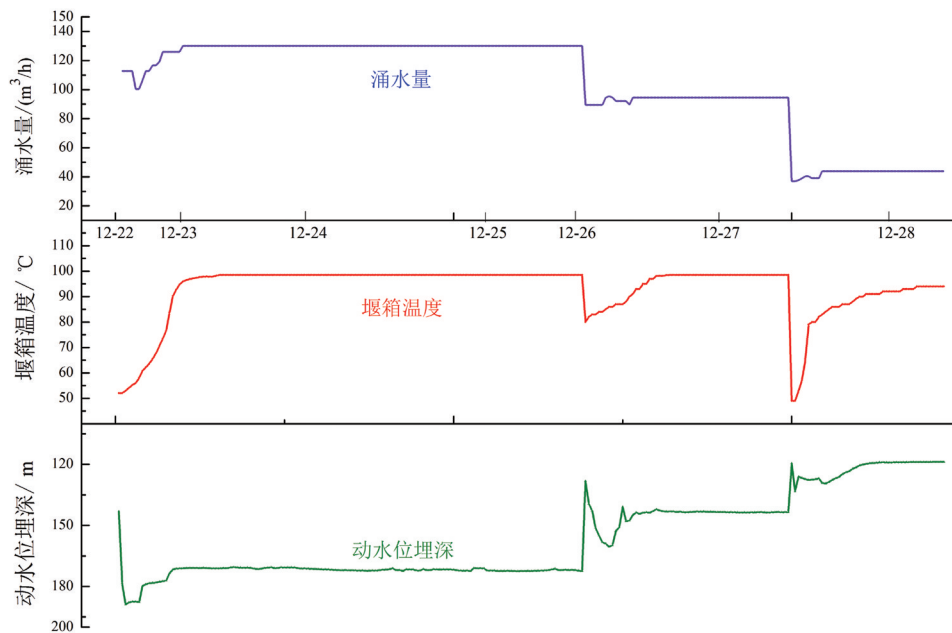


图7 稳定流降压抽水试验历时曲线
Fig.7 Duration curve of stable pumping test

层热储参数,对地热井开展了3个落程的稳定流降压抽水试验。其中,大落程试验历时62 h,涌水量130.2 m³/h,水温度稳定在100℃,稳定时间39.5 h;中落程试验历时24 h,涌水量94.5 m³/h,水温度稳定在100℃,稳定时间16.5 h;小落程试验历时16 h,涌水量43.9 m³/h,水温度稳定在98℃,稳定时间8 h(图7)。

4 结果与讨论

4.1 热储结构特征

综合全井段地球物理测井、岩心与岩屑及区域

地热地质等资料,CGSD-01井钻遇地层包括:第四系、新近系、寒武系、青白口系及蓟县系。钻遇主要储层5个,主要包括新近系明化镇组、馆陶组2个砂岩热储,寒武系昌平组灰岩热储,蓟县系雾迷山组三四段和一二段白云岩热储(表2)。

本次研究在地热井中实现雾迷山组四、三、二段精细划分,自上而下叙述如下。

雾迷山组四段(Jxw₄):深度段为2258~2896 m,地层厚度638 m。上部岩性主要为浅灰色细晶白云岩夹灰黑色泥晶白云岩,偶见少量深灰色厚层角

表2 天津东丽湖CGSD-01井钻遇地层表
Table 2 Geological stratum of well CGSD-01 in the Tianjin

地层				钻遇地层底界深度/m	地层厚度/m	储盖特征	
界	系	组	段				
新生	第四系(Q)	平原组		355	355	盖层	
界	新近系(N)	明化镇组(N ₂ m)	上段	763	408	砂岩热储,孔隙型	
			下段	1160	397		
(Cz)		馆陶组(N ₁ g)		1500	340	砂岩热储,孔隙型	
古生		张夏组(C ₂ zh)		1604	104	隔层	
界	寒武系(C)	馒头组(C ₁ m)		1914	310		
(Pz)		昌平组(C ₁ ch)		1975.6	61.6		灰岩热储,裂隙溶隙型
中、新	青白口系(Qb)	景儿峪组(Qb ₁ j)		2186	208.4	隔层,下部发育薄层灰岩热储	
		长龙山组(Qb ₂ ch)		2258	74	隔层,下部发育角砾状白云岩热储	
元古			四段	2896	638	白云岩热储,裂隙溶隙型,主力储层	
界	蓟县系(Jx)	雾迷山组(Jx _{1-2w})	三段	3715	819		
(Pt)			二段	4051.68(未揭穿)	336(未揭穿)		新储层,白云岩热储,裂隙溶隙型
			一段				

砾状白云岩、灰白色硅质白云岩等;下部岩性主要为浅灰色细晶白云岩与灰黑色泥晶白云岩、泥质白云岩交互;底部主要发育灰黑色白云质泥岩夹细晶白云岩、泥晶白云岩、硅质白云岩。受原始沉积及沉积后多期次构造与岩溶作用等影响,雾迷山组四段白云岩层系整体较破碎,钻井岩心中裂隙和溶蚀孔洞极其发育,为地热水提供了良好的储集空间。

雾迷山组三段(Jxw₃):深度段为2896~3715 m,地层厚度819 m。上部岩性主要为深灰色细晶白云岩与灰黑色泥晶白云岩、泥质白云岩、白云质泥岩交互。电测曲线上,雾迷山组三段上部的GR值较雾迷山组四段底部低为特征,测井解释的泥质含量值也表现出类似特征;雾迷山组三段测井资料解释的孔隙度和渗透率值,下部整体较上部好(图8);下部岩性主要发育浅灰—灰黑色细晶白云岩夹灰黑色泥晶—泥质白云岩、灰质泥晶白云岩及白云质泥岩;底部以发育一套紫红色泥质白云岩夹浅灰色细晶白云岩为典型特征,厚度约73 m,裂隙不发育,具有隔水—弱透水性,作为与下伏雾迷山组二段的分界。

雾迷山组二段(Jxw₂)深度段为3715~4051 m,地层厚度336 m,未钻穿。与上覆雾迷山组三段相比,雾迷山组二段的岩性及电测特征存在明显的差别(图8)。岩性特征上,雾迷山组二段上部主要发育浅灰色细晶白云岩夹浅灰色粉晶白云岩、灰黑色泥质白云岩,之上为雾迷山组三段底部紫红色泥质白云岩作为两者明显分界;雾迷山组二段下部主要为浅灰色粉晶白云岩与灰黑色泥质白云岩交互。电测曲线上,雾迷山组二段上部的GR值、自然电位值(SP)较雾迷山组三段底部低为特征,测井解释的泥质含量值也体现出类似特征;雾迷山组二段上部的深侧向、浅侧向电阻率较雾迷山组三段底部高为特征。雾迷山组二段内部,自下而上,GR值、自然电位值(SP)、深侧向电阻率、浅侧向电阻率及测井解释的泥质含量呈逐渐变小趋势;声波时差呈逐渐变大趋势,测井资料解释的孔隙度和渗透率呈逐渐变大趋势,指示雾迷山组二段上部的热储层较下部更为发育。

4.2 温度特征

2018年11月19日对CGSD-01井开展了稳态测温。从测温曲线(图9)可以看出,CGSD-01井底

温度105℃。井温总体呈凸型曲线特征,体现了储盖层热传导机制为总体传导型、层间对流型。总体地温梯度2.4℃/100 m。其中,0~400 m第四纪地层地温梯度最高,可达8℃/100 m;400~2300 m新近系与寒武系盖层地温梯度次之,为2.4℃/100 m;2300~3500 m雾迷山组三、四段主力储层受对流作用影响,地温梯度最小,为0.83℃/100 m;3500 m以下雾迷山组二段储层地温梯度为1.7℃/100 m,对流作用较主力储层稍弱。

岩石热物性分析表明,雾迷山组二段岩石热导率在4.33~7.96 W/(m·K)(10个样品,表3),平均值5.66 W/(m·K),略高于雾迷山组三四段平均值4.37 W/(m·K)。

4.3 热储参数

热储参数计算主要依据降压抽水试验计算。由于地热水密度与温度具有相关性,造成观测水位不能真实地反映地热井实际水位的变化,这种现象称之为“井筒效应”。资料整理过程中,以储层中部温度102.6℃作为储层温度对试验观测数据进行校准。校正后,做出的动水位埋深曲线如图10。

采用Dupuit公式与W.Sihart公式对试验数据进行分析计算CGSD-01井的热储参数。本次抽水试验目标热储层为蓟县系雾迷山组二段,厚度336.68 m(未穿透),根据测井数据显示,裂隙厚度为123.1 m。根据降压抽水试验数据及相关校正,地热井基本参数见表4。计算结果见表5。依据降压抽水试验计算结果,取三个落程试验平均值可以得出,CGSD-01井单位涌水量1.53 m³/h·m,渗透系数0.40 m/d,导水系数48.69 m²/d。

4.4 水化学特征

抽水试验过程中,采集样品对雾迷山组二段地热水进行了水化学、同位素和气体成分分析。

水化学分析表明,雾迷山组二段地热水水化学类型为Cl·SO₄·HCO₃-Na型,矿化度1770.0 mg/L,总硬度124.6 mg/L(以CaCO₃计),pH值7.63。

结垢性和腐蚀性表明,地热水不生成碳酸钙垢,不生成硫酸钙垢,不生成硅酸盐垢,对管道及利用设施具有中等腐蚀性。

气体组分测试表明,溶解气体中以氮气和甲烷为主,分别占气体组分含量的66%和27%,还有少量乙烷、丙烷、异丁烷和异戊烷,指示储层处于还原环境。

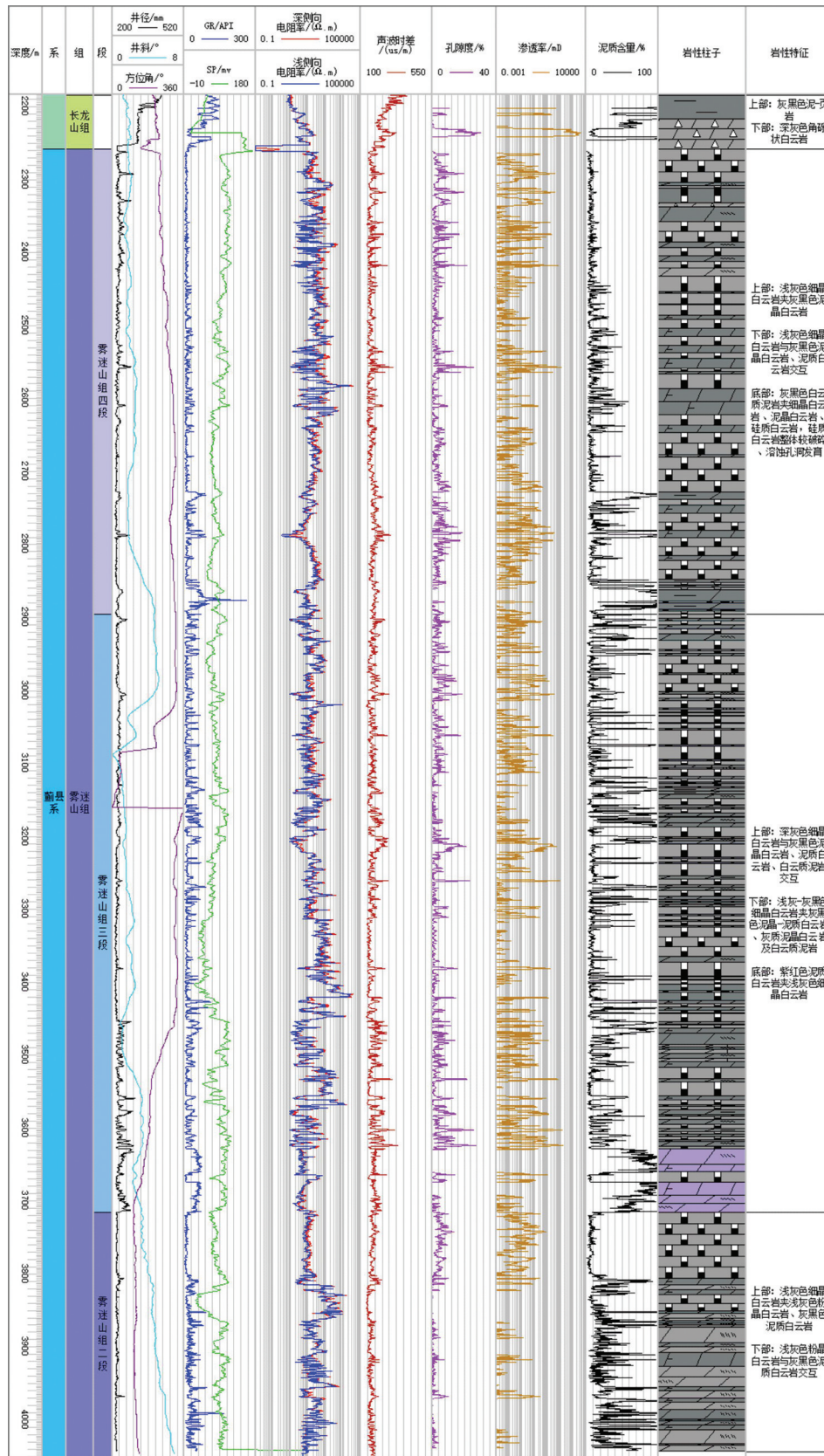


图8 CGSD-01井蓟县系雾迷山组柱状图

Fig.8 Comprehensive strata log diagram of well CGSD-01 in Wumishan Formation, Jixian Group

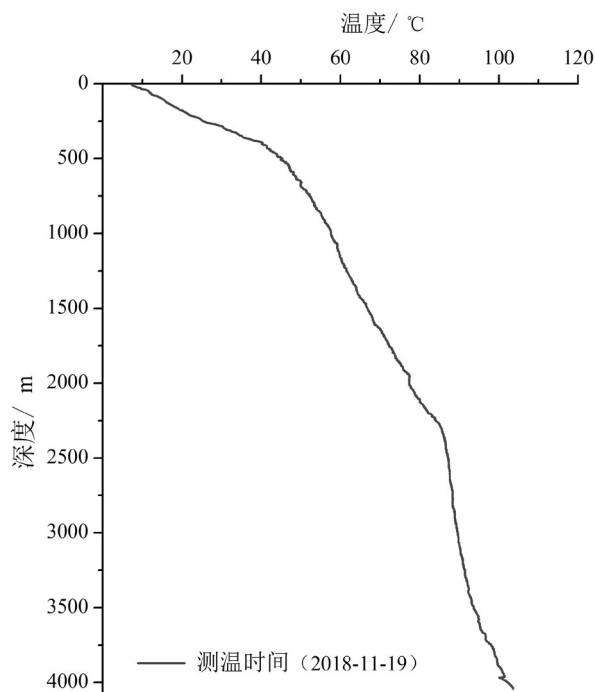


图9 CGSD-01井测温数据

Fig.9 Temperature log of well CGSD-01

表3 CGSD-01井雾迷山组二段热储热导率测试值
Table 3 Thermal conductivity test results of Wumishan Formation section 2 in well CGSD-01

样品编号	样品深度	热导率/[W/(m·k)]
1	3892	7.96
2	3893	6
3	3895	4.84
4	3897	5.21
5	3900	5.6
6	3985	6.1
7	3986.5	5.87
8	3988	5.2
9	3989.5	4.33
10	3990.5	5.49

同位素分析表明,地热水 δD 为 -72‰ ~ -72.7‰ , $\delta^{18}O$ 为 9.3‰ ~ -9.5‰ , $\delta^{13}C$ 为 -3‰ ~ -3.6‰ , $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.7113 ~ 0.7114 。综合水化学和同位素特征,初步推断雾迷山组二段地热水来源于大气降水,主要发生混合、阳离子交替吸附、碳酸盐岩溶解、硫酸盐还原等作用,且未达到平衡。

4.5 开发利用潜力分析与建议

从区域地质背景和地层沉积序列看,雾迷山二

表4 CGSD-01井热储参数计算基本参数

Table 4 Reservoir parameters of well CGSD-01

基本参数	大落程	中落程	小落程
单井涌水量/(m^3/h)	130.2	94.5	43.9
校正后动水位埋深/m	165.85	137.59	103.72
水位降深/m	89.56	61.30	27.43
热水头/m		76.29	
热储层中点埋深/m		3883.34	
热储层厚度/m		336.68	
裂隙总厚度/m		123.1	
井半径/m		0.079	

表5 CGSD-01井地热热储参数计算结果

Table 5 Interpretation results of pumping test for well CGSD-01

热储参数	大落程	中落程	小落程
单位涌水量/($m^3/h \cdot m$)	1.45	1.54	1.60
降压影响半径/m	566.39	390.78	169.17
渗透系数/(m/d)	0.40	0.41	0.38
导水系数/(m^2/d)	49.23	50.03	46.82

段热储在潘庄凸起区全区均有分布,分布面积约 $604 km^2$,依据CGSD-01地热参数井信息,对潘庄凸起雾迷山组二段热储热量进行保守估算。年可开采热资源量按照100 a富水段可回收热量的 0.01% 进行保守估算,其热量每年折合标煤250万t,初步估计可满足供暖面积 $6114 \times 10^4 m^2$ 。

为了提高地热资源利用率,本文建议推广地热利用集约节约新技术,采用地热梯级利用联合水源热泵、地板辐射采暖、群井联动、地热与燃气或太阳能等多能源结合技术,降低尾水排放温度,实现地热资源利用最大化。

5 结论

(1)综合全井段地球物理测井、岩心与岩屑及区域地热地质等资料,CGSD-01井钻遇主要储层5个,主要包括新近系明化镇组、馆陶组2个砂岩热储,寒武系昌平组灰岩热储,蓟县系雾迷山组三四段和一二段白云岩热储。

(2)雾迷山组二段上部单位涌水量 $1.53 m^3/h \cdot m$,渗透系数 $0.40 m/d$,导水系数 $48.69 m^2/d$,岩石热导率 $5.66 W/(m \cdot K)$,地热水类型为 $Cl \cdot SO_4 \cdot HCO_3 - Na$ 型,矿化度 $1.7 g/L$,热储参数与潘庄凸起三、四段热储相近。

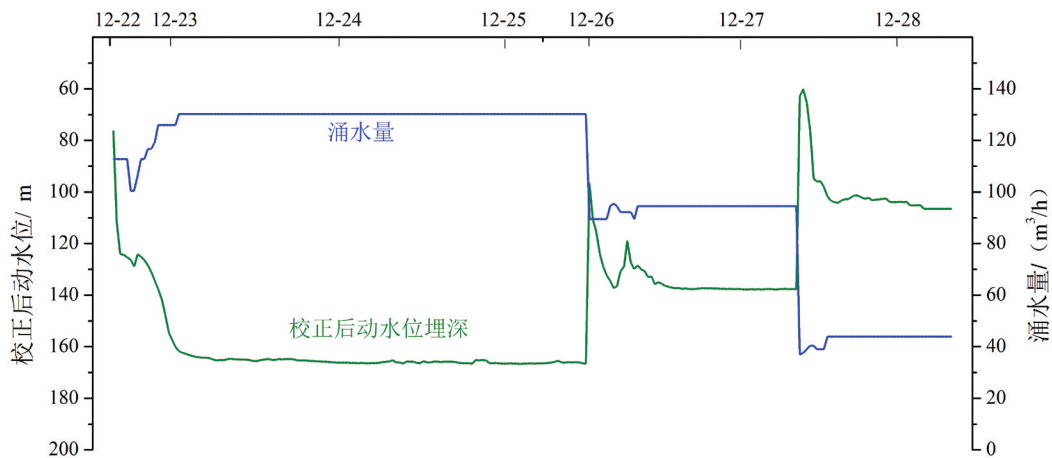


图10 校正至热储温度降压抽水试验历时曲线

Fig.10 Corrected duration curve of stable pumping test with reservoir temperature

(3)CGSD-01井降压抽水试验结果表明,蓟县系雾迷山组二段单井最大涌水量可达 $130\text{ m}^3/\text{h}$,出水温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$,单井可满足约 30 万 m^2 建筑物供暖需求;初步估计潘庄凸起雾迷山组二段热储热量可满足供暖面积 $6114\times 10^4\text{ m}^2$ 。

(4)从区域地层沉积规律看,天津地区深部雾迷山组一段、杨庄组、高于庄组,厚度大、岩溶发育,与雾迷山组四、三、二段性质相似,均具有成为高产新储层的可能性,加强深部地热探测研究意义重大。

致谢:感谢文冬光研究员、张森琦和赵苏民教授级高级工程师以及张梅生教授对本论文的指导和建议,使作者收益颇丰。

References

- Chen Moxiang. 1988. Geothermal in North China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Dong Weibin, Zhao Ming, Liu Fang, Zhao Guo. 2008. The time-frequency electromagnetic method and its application in Western China[J]. Applied Geophysics, 5: 127-135.
- Gao Chang. 2003. Comprehensive Geophysical Survey Report on 1: 50000 Regional Geological Survey in Deep Coverage Area of Tianjin[R]. Tianjin: Tianjin Geological Survey Research Institute (in Chinese with English abstract).
- Lin Li, Zhao Sumin, Ruan Chuanxia. 2007. The inhomogeneity characteristics of geothermal storing karst caves of Wumishan reservoir of Jixian System in the deep part of Tianjin[J]. Geoscience, 21(4): 600-604(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 40(1): 312-321(in Chinese with English abstract).
- Song Dan. 2020. Influences of Dongli Lake Water Reinjection in Tianjin City on the Scaling Characteristics of Geothermal Reservoirs in Wumishan Formation, Jixian System[D]. Changchun: Jilin University, 1-125(in Chinese with English abstract).
- Tianjin Geothermal Exploration and Development Designing Institute. 2000. Deep Geothermal Resources Survey Report in Tianjin[R]. Tianjin(in Chinese).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geology in China, 44(6): 1074-1085(in Chinese with English abstract).
- Wang Jige, Chen Ruijun, Yi Zhidong, Wu Peiliang. 2013. Analysis on the Ordovician geothermal well construction risk in the Panzhuang Uplift[J]. Geological Survey and Research, 36: 71-75(in Chinese with English abstract).
- Wang Kun. 2008. Background History and Status of Geothermal Utilization in Tianjin. Lectures on Geothermal Areas in China[R]. Reykjavik: 12-23.
- Wang Weixing, Sun Yudong, Yang Yongjiang. 2010. Geology and hydrogeochemical characteristics geothermal paired wells in Dongli Lake Area, Tianjin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 34: 44-48(in Chinese with English abstract).
- Wu Aimin, Ma Feng, Wang, Guiling, Liu Jinxia, Hu Qiuyun. 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 523-532(in Chinese with English abstract).
- Zhang Baiming, Lin Li, Zhao Sumin. 2006. Analysis on mechanism of geothermal origin in Tianjin area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, (2): 104-107(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Zhang Baojian, Wen Dongguang, Shen Zhaoli, Qi Lin. 2009. Geothermal resource of structural trap type: An important geothermal resource conceptual model[J]. *Geology in China*, 36(4): 927–931(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 46(2): 255–268(in Chinese with English abstract).
- Zhao Sumin, Gao Baozhu., Li Xuemei. 2006. Character and water-temperature conductivity of the Cangdong Fault (Tianjin Segment) [J]. *Geological Survey and Research*, 30: 121–127(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yu, Lei Xiaodong, Zhao Xuchen, Sun Mingguo. 2020. Application of 2D seismic exploration in geothermal resource exploration in Beijing Municipal Administrative Center[J]. *Urban Geology*, 15(3):336–341(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yinming, Hu Xiaoying, Zhang Zhaofang. 2013. Application of time-frequency electromagnetic method in detecting water-rich geological anomalies in coal mine, proceedings[C]//Chinese Geophysics 2013–Proceedings of the 24th Meeting(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yinming, Liu Xuejun, Zhang Chunhe. 2015. The TFEM technology for quick identification of 'sweet spot' of shale gas and its applications[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39: 60–63(in Chinese with English abstract).
- 陈墨香. 1988. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社.
- 高昌. 2003. 天津市深覆盖地区1:50000区域地质调查综合物探研究报告[R]. 天津:天津市地质调查研究所, 6–33.
- 林黎, 赵苏民, 阮传侠. 2007. 天津地区深部蓟县系雾迷山组热储岩溶非均一性特征研究[J]. *现代地质*, 21(4): 600–604.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 40(1): 312–321.
- 宋丹. 2020. 天津东丽湖地表水回灌对蓟县系雾迷山组地热储层结垢特征影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 1–125.
- 天津地热勘查开发设计院. 2003. 天津深部地热资源普查报告[R]. 天津.
- 天津市地质调查研究所. 2003. 天津区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 44(6): 1074–1085.
- 王继革, 陈瑞军, 易志东, 武佩良. 2013. 潘庄凸起奥陶系地热井施工风险分析[J]. *地质调查与研究*, 36(1): 71–75.
- 王卫星, 孙玉东, 杨永江. 2010. 天津市东丽湖地热对井的地质与水文地球化学特征[J]. *物探与化探*, 34(1): 44–48.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. *地球学报*, 39(5): 523–532.
- 张百鸣, 林黎, 赵苏民. 2006. 天津地区地热形成机理[J]. *水文地质工程地质*, (2): 104–107.
- 张保建, 文冬光, 沈照理, 亓麟. 2009. 一种值得重视的地热资源概念模式——构造圈闭型地热资源[J]. *中国地质*, 36(4): 927–931.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. *中国地质*, 46(2): 255–268.
- 赵苏民, 高宝珠, 黎雪梅. 2006. 沧东断裂(天津段)特征及导水导热性质分析[J]. *地质调查与研究*, 30(2): 121–127.
- 赵玉, 雷晓东, 赵旭辰, 孙明国. 2020. 二维地震勘探在北京城市副中心地热资源勘查中的应用[J]. *城市地质*, 15(3): 336–341.
- 周印明, 胡晓颖, 张兆芳. 2013. 时频电磁法在探测煤矿富水地质异常体中的应用[C]//中国地球物理第二十四分会论文集.
- 周印明, 刘雪军, 张春贺. 2015. 快速识别页岩气“甜点”目标的时频电磁勘探技术及应用[J]. *物探与化探*, 39(1): 60–63.

附中文参考文献