

武汉西部蔡甸地区中深层地热资源主控因素分析

肖礼军^{1,2}, 杨飞¹, 付宜兴³

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 中石化新星湖北新能源有限公司, 湖北 武汉 430070; 3. 中石化江汉油田分公司, 湖北 潜江 433121)

摘要: 武汉西部蔡甸地区拥有丰富的地热资源,其热源为地球内部传导热,主要热储层为古生界碳酸盐岩。鉴于武汉中心城区各类地球物理勘查手段受限,充分利用前期江汉油田的石油勘探和水文资料勘探成果,结合 2021 年 4 月成功钻探的索河 1 地热井资料,分析后认为蔡甸地区储热储水构造主要为背斜构造,导热导水通道则主要为断裂;蔡甸地区地热资源主控因素为断裂和古生界碳酸盐岩溶储层,且岩溶储层埋深适中,具备很好的地热资源开发前景;蔡甸地区有利地热资源勘查目标是与深大断裂相伴的各类背斜构造。

关键词: 武汉西部; 碳酸盐岩; 地热; 储层; 断块; 导水通道

中图分类号: P314.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0757-09

Analysis of the main control factors of middle and deep geothermal resources in the Caidian area, western Wuhan

XIAO Li-jun^{1,2}, YANG Fei¹ and FU Yi-xing³

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Xinxing Hubei New Energy Co., Ltd, SINOPEC, Wuhan 430070, China; 3. Jiangnan Oilfield Branch, SINOPEC, Qianjiang 433121, China)

Abstract: The Caidian area in western Wuhan possesses abundant geothermal resources, with the heat source being the conductive heat from the earth's interior, primarily stored in the Paleozoic carbonate reservoir. Due to the limitations of various geophysical exploration methods in central Wuhan, the previous petroleum exploration and hydrological data from the Jiangnan Oilfield were fully utilized. Combined with the data from the successful drilling of the Suohe1 geothermal well in April 2021, it is analyzed and concluded that the structural framework for heat and water storage in the Caidian area is mainly dominated by anticline structures and the thermal and water transmission channel is mainly fault. The main controlling factors of geothermal resources in the Caidian area are faults and Paleozoic carbonate karst reservoirs, and the karst reservoirs are moderately buried, indicating a good prospect for geothermal resource development. The favorable exploration target of geothermal resources in the Caidian area is various anticline structures associated with deep and large fault.

Key words: western Wuhan; carbonate rocks; geothermal; reservoir; fault block; water channel

Fund support: Joint Fund Key Project(U20A2092)

武汉地区西部山清水秀,拥有水质优良的后官湖和森林覆盖率超 90%以上的九真山、嵩阳山等,形成山水相依、田园相映、林城相拥的特色。2014 年武汉市开始建设中法生态示范城,2021 年中国政府公

收稿日期: 2023-03-28; 接受日期: 2023-08-10; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 联合基金重点项目(U20A2092)

作者简介: 肖礼军(1969-),男,高级工程师,主要从事油气田地面工程建设综合研究和管理工作的;通讯作者: 杨飞(1967-),男,副教授,主要从事矿产普查与勘探及地球物理综合研究的工作, E-mail: randyang@126.com。

布碳达峰、碳中和的“时间表”及“路线图”,决定了武汉地区将贯彻低碳生态的发展理念,促进清洁能源、可再生资源和能源的利用(李文等, 2020; 朱建江等, 2022),并致力于将其建设成为城市可持续发展方面的典范。为此,地热能资源的勘查与利用对于武汉市乃至全国绿色经济的发展具有重大意义(Sowizdzal, 2018; 范威等, 2019; 郭盼等, 2020)。

武汉地区北临秦岭-大别造山带的大洪山前陆冲断带,武汉西部蔡甸地区主体为由古生界组成的褶皱带(朱清波等, 2022),呈北西-北北西-北西向反“S”状展布(田忠华等, 2022),缺失中新生界。根据武汉市中深层地热赋存模式研究成果(牛俊强等, 2019),蔡甸地区主要为碳酸盐岩热储,古生界具备形成大型岩溶热储的条件(丁同领等, 2012; 王贵玲等, 2020)。2021年4月14日,在蔡甸区西部索河镇成功钻探武汉市第一口地热井(赵子栋等, 2020),出水热储层为寒武系覃家庙组碳酸盐岩,井口水温达50.2℃,出水量超过2 000 m³。另外,2014年11月在蔡甸区西边的汉川市马口镇天屿湖成功钻探地热温泉,出水层位为石炭系的碳酸盐岩(范威等, 2019),井口水温约52℃,日出水量为1 600 m³。这些地热勘查成果的取得预示着蔡甸区具有丰富的中深层水热型地热资源。然而,受武汉市中心城区发展的制约,各类地球物理探测手段受限,本文充分利用前期石油勘探资料(李昌鸿等, 2008; 梁学堂等, 2016),在对武汉西部蔡甸地区的地热储水构造进行研究的基础上,探讨了蔡甸地区地热资源勘探方向与靶区。

1 地质概况

武汉地区西部在大地构造上属于中扬子东部,东北依秦岭-大别造山带,南邻雪峰-江南板内造山带,现今构造格局主要为受南北两大弧形构造带夹持而形成的隆凹相间的挤压构造。受印支运动的强烈构造作用及燕山运动的进一步影响,研究区地层剥蚀严重,残留地层主要为震旦系至二叠系,且表层大部分地区被第四系松散堆积层覆盖。泥盆系和志留系则主要为陆棚相沉积,以碎屑岩为主。奥陶系至震旦系则以海相碳酸盐岩沉积为主(易杨等, 2021)。武汉西部地区已钻地热井(集1井、索河1井等)揭示的热储层主要为古生界碳酸盐岩的岩溶型热储,即下古生界碳酸盐岩是武汉地区西部的重

要的热储层(罗小杰, 2013; 张微等, 2019)。

2 热储层特征

武汉地区西部下古生界碳酸盐岩岩溶型热储层主要包括上震旦统灯影组白云岩段、下寒武统石龙洞组-中上寒武统白云岩(盛贤才等, 2011),分布广泛,埋深一般大于500 m,厚度亦较大,局部地区超过2 000 m,在向斜构造区埋深大,背斜构造区埋深小。

2.1 上震旦统灯影组热储层

区内上震旦统发育有两套地热储层,热储集岩以白云岩为主。第1套热储层发育灯影组底部,主要为台地相白云岩;第2套热储层发育在灯影组上段,主要有台地相泥粉晶白云岩和藻白云岩两类。PS1井灯影组储集层厚度达80 m(盛贤才等, 2011),平均孔隙度4%~5%(图1)。平面上灯影组储层广泛分布于江汉平原区,储层厚带主要集中在潜江-仙桃一带,研究区预计厚度100 m左右。

2.2 寒武系热储层

下寒武统石龙洞组上部-中上寒武统储集性能最好,储集岩均为白云岩,包括细-中晶白云岩、鲕状白云岩、生屑白云岩、砂屑白云岩及藻白云岩等。京山惠亭山剖面实测下寒武统储层厚度45 m,孔隙度6.4%~8.1%,渗透率0.37~1.74 md(图2),下寒武统石龙洞组储集岩最厚区域主要分布在当阳-荆门一带,厚度可达100 m,研究区预计厚度50~80 m。

3 储热储水构造

研究区内构造主要被一组北西向断层和北东向断层交叉控制,褶皱构造平面上表现为一系列的东向西向转北西向展布,总体上为紧闭线性褶皱系,褶皱形态为紧闭同斜-斜歪褶皱(图3),轴面倾向N-NE,倾角在30°~70°之间,局部近直立;一般背斜南翼较陡,北翼较缓,显示构造的应力方向为由北(东)向南(西)挤压。褶皱均为复式背、向斜,次级褶皱极为发育,转折端处的次级褶皱多表现为紧闭同斜褶皱(李昌鸿等, 2008)。

根据中石化2006年施工的临-黄地震大剖面地质解释显示(图4),研究区所处的秦岭-大别造山带地区构造主要表现为一系列逆冲断裂形成构造断片的相互叠置,断裂之间地层不连续,断裂面北倾且较陡,与地层产状小角度相切,地层缺失明显,为造山

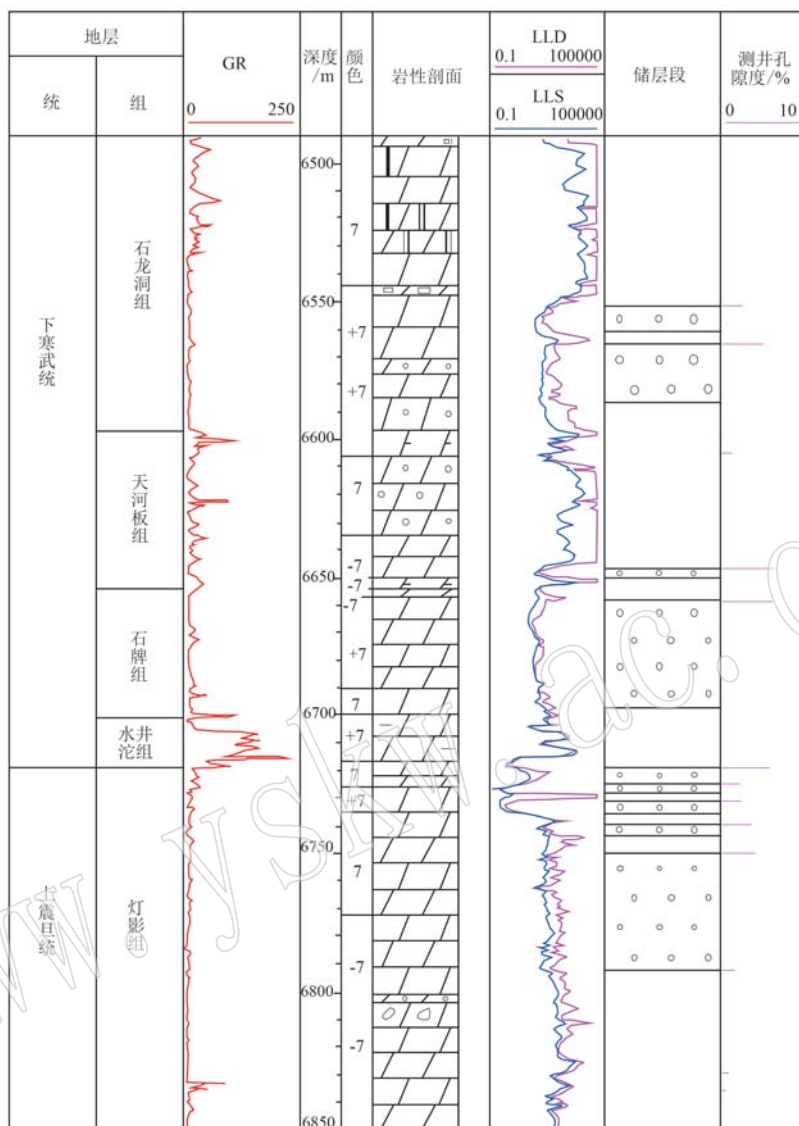


图 1 PS1 井灯影组储层综合柱状图(盛贤才等, 2011)

Fig. 1 Comprehensive histogram of Dengying Formation reservoir in well PS1(Sheng Xiancai *et al.* , 2011)

带边缘构造活动强烈的地带。研究区位于襄广断裂西南,构造形态以断层-褶皱为主,发育推覆-冲断断层相关的叠瓦状紧闭褶皱,褶皱形态自北向南由倒转→紧闭→正常,变形逐渐减弱。褶皱两翼不对称,南翼略陡,指示应力方向为由北向南逆冲。在逆冲构造作用下,研究区形成一系列隆凹相间褶皱,且在隆起部位缺失中生界及上古生界,直接见下古生界。已钻探的集 1 井(图 4),钻穿第四系覆盖,即现寒武系白云岩。位于集 1 井西侧的索河 01 井,钻过第四系,则为志留系坟头组 685 m 厚的灰绿色粉砂质页岩、龙马溪组 65 m 厚的黑色碳质页岩、奥陶系灰岩和寒武系灰色厚层白云岩。

在武汉市中法新城所钻的地热调查井 Z1 为定向井,该井穿过第四系后即志留系,并在垂直井深 780 m 处钻入奥陶系灰色灰质白云岩。该井在垂直井深 992 m 处,钻遇断裂,并穿过断裂带进入志留系,证实武汉西部构造格局为隆凹相间、轴向北西的一系列褶皱构造(图 5)。Z1 井 400 m 以下井段进行测温,均在 41℃ 以上。

4 地下水补径排

根据汉川市马口镇地热钻井(天屿湖地热井)、武汉市蔡甸区索河 01 井地下水水质全分析结果,两

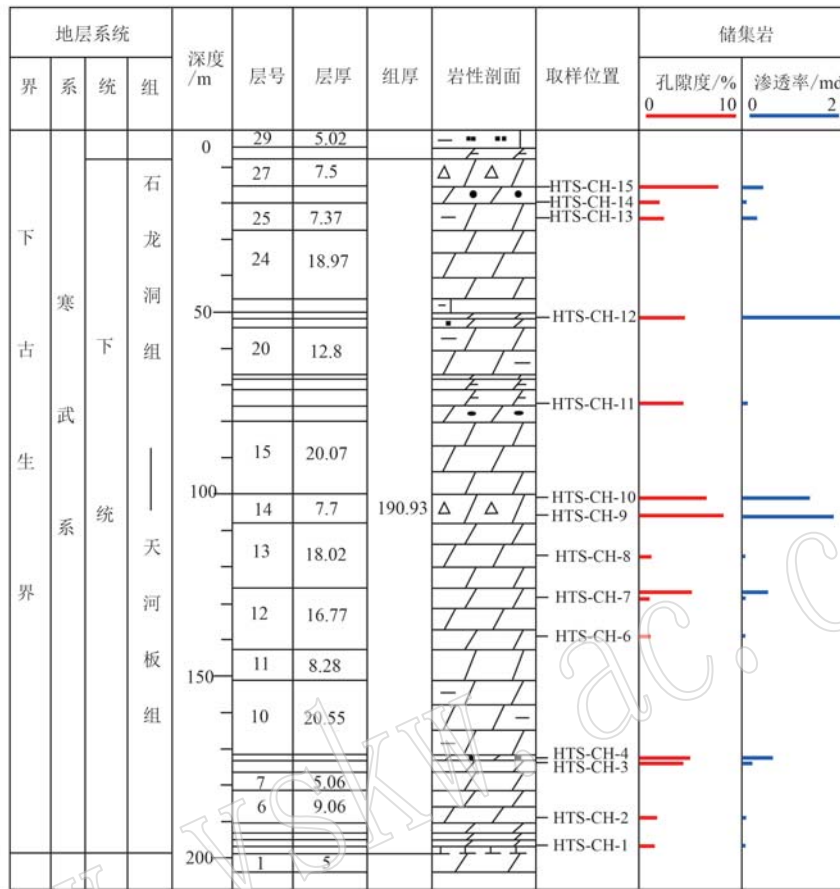


图2 京山惠亭山下寒武统石龙洞组储层综合柱状图(李昌鸿等, 2008)

Fig. 2 Comprehensive histogram of Shilongdong Formation of Lower Cambrian in Huiting Mountain, Jingshan (Li Changhong et al., 2008)

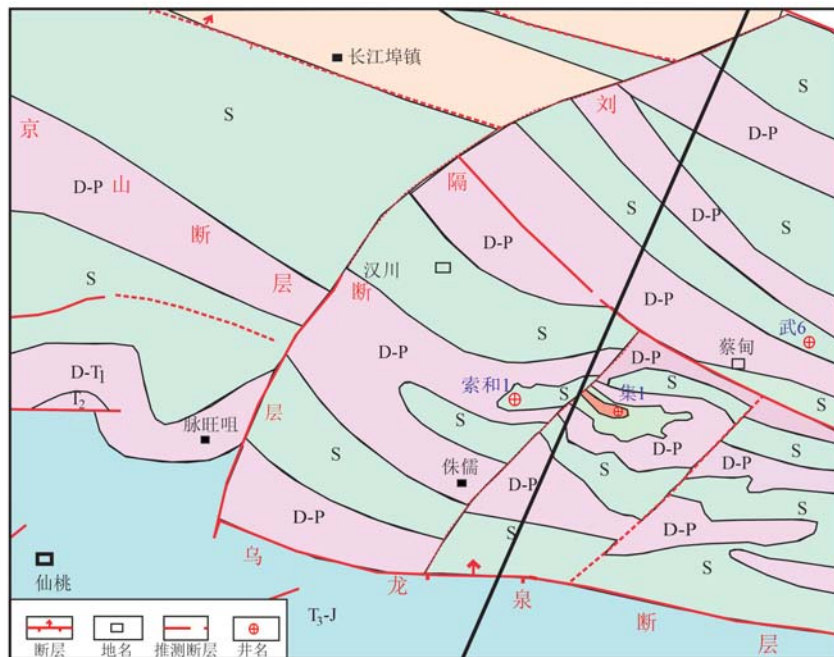


图3 研究区前白垩系剥皮地质图(李昌鸿等, 2008)

Fig. 3 Geological denudation map of pre Cretaceous in the study area(Li Changhong et al., 2008)

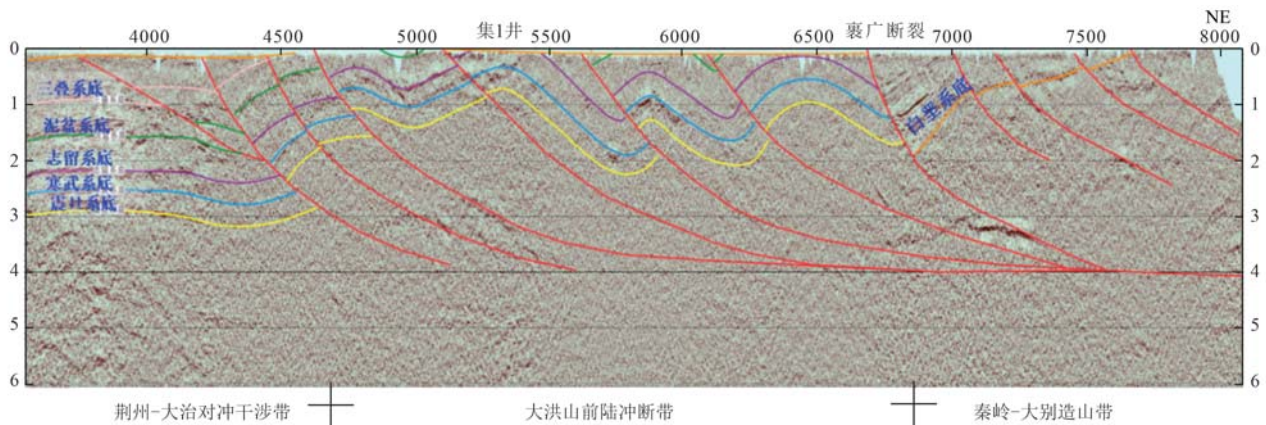


图 4 临-黄地震大剖面地质解释图(李昌鸿等, 2008)

Fig. 4 Geological interpretation map of Lin-Huang seismic section(Li Changhong *et al.* , 2008)

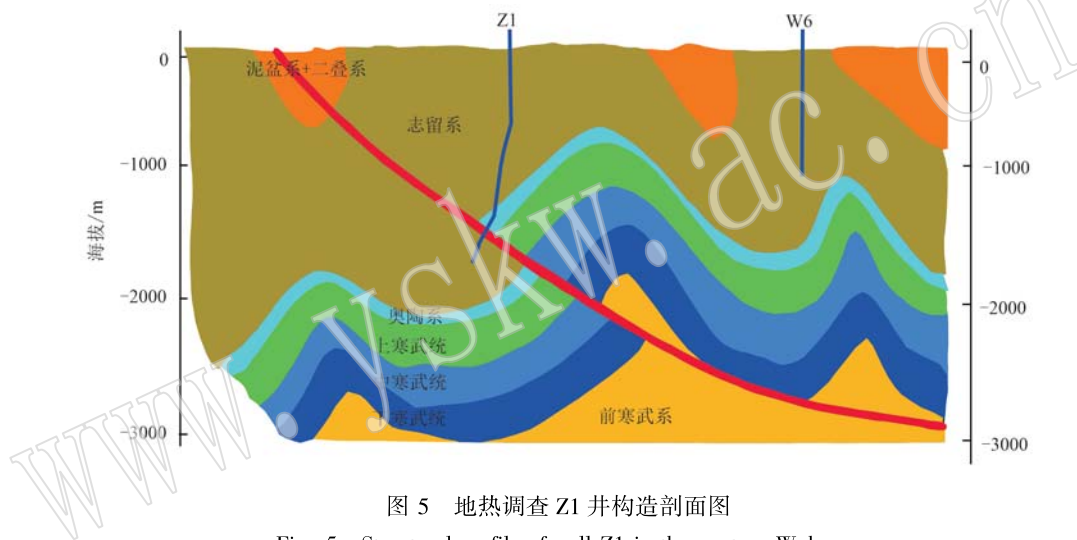


图 5 地热调查 Z1 井构造剖面图

Fig. 5 Structural profile of well Z1 in the western Wuhan

处地下水类型均为硫酸钙镁型。依据地下水化学组分的演变(图 6)可知,地下水的补径排与水中溶解性总固体(TDS)含量呈正相关,随着 TDS 含量的变化,地下水中主要离子成分也随之变化。在补给区,地下水 TDS 含量低,常以 HCO_3^- 及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主;径流区 TDS 中等(李昌鸿等, 2008),阴离子常以 SO_4^{2-} 为主,主要阳离子可以是 Na^+ ,也可以是 Ca^{2+} ;排泄区一般地下水 TDS 较高,以 Cl^- 及 Na^+ 为主(易扬等, 2021)。由此可以推测武汉西部盆山结合带处于径流区,地下热水是由大洪山地区降水经远距离运移同时接受围岩增温形成的(梁杏等, 2022)。

研究区残留地层的分布受早期构造形态控制,主要发育断层相关褶皱,构造呈北西西向展布,背、向斜的分布决定了残留地层的多寡。背斜区地层剥蚀严重,核部残留最新地层以志留系为主,局部隆升

较高的位置地层剥蚀到寒武系(如集 1 井区),向斜区地层剥蚀相对较少,核部残留最新地层以二叠系为主。热储层主要为古生界碳酸盐岩储层,全区均有分布,其补给与径排受断裂带控制。

5 热源及导热导水通道

武汉市地热热源主要为地球内部的传导热及部分地壳岩石放射性衰变产生的热能,地热流体温度取决于地温梯度和流体循环深度。区内大地热流最小值为 47.3 mW/m^2 ,最大值为 54 mW/m^2 ,平均值 50.4 mW/m^2 ,低于湖北省大地热流平均值(53.7 mW/m^2)和中国大陆大地热流平均值(61 mW/m^2)。区内地温梯度一般为 $2 \sim 2.5^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,亦远低于全国平均值 $3.3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ (姜光政等, 2016)。

断裂破碎带往往是地下水循环、运移的主要通

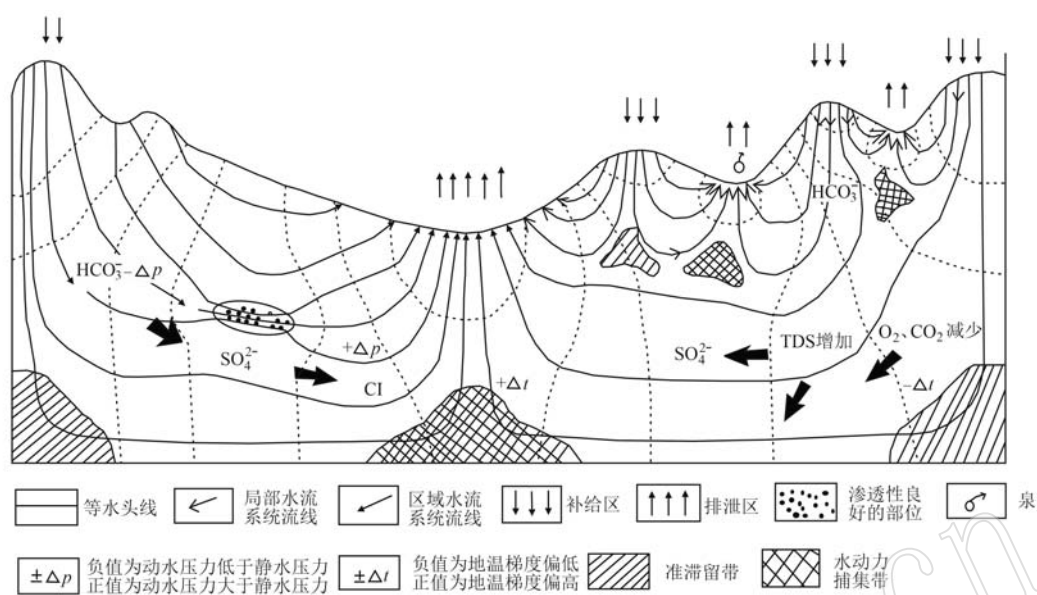


图6 地下水化学演变示意图(梁杏等, 2022)

Fig. 6 Schematic diagram of groundwater chemical evolution (Liang Xing *et al.*, 2022)

道(雷海飞等, 2020),特别是深大断裂、活动性断裂更是地下水进行深循环的重要通道,对地热田形成起着关键作用,地下水在沿断裂深循环过程中将分散在岩体中的热量加以吸收和积蓄,形成地热流体,部分地区深部热液沿断裂带上涌,与浅部温度较低的热水混合,形成较高温度的地下水和局部对流性地热系统(汪集旻, 2015; 王贵玲等, 2017a)。

区内可能成为导热水构造的断裂主要有:襄广断裂、麻团断裂,京山-乌龙泉断裂及其次级断裂等。另外,发育于碳酸盐岩中的裂隙岩溶系统是岩溶水运移、储存的主要通道(李伟等, 2016; 胡斌等, 2021),当其发育深度较深或受深大断裂控制时,将形成岩溶热储地热流体的主要导热水通道(谭双等, 2021)。

6 蔡甸地区地热资源靶区选择

根据储热储水构造及地热储层特征研究,认为蔡甸地区地热资源主控因素为深大断裂和古生界碳酸盐岩溶储层(柯柏林等, 2019),地热流体赋存于震旦系-奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶等储层(张德忠等, 2013),热储层沿襄广断裂带前缘断层单冲带呈北西向分布,热储层中的地热流体通过碳酸盐岩出露区接受大气降水补给,属近源补给(王贵玲等, 2018),大气降水入渗沿襄广断裂带控制的一系列北

西向展布的冲断断裂形成的裂隙岩溶向深部运移,径流过程中获取围岩的热量,形成地热流体,并沿断裂向上运移赋存于震旦系-奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶等储层中,形成地热田(熊亮萍等, 1988; 王贵玲等, 2017b)。

据此,武汉西部蔡甸地区地热带区选择,应依据:① 下古生界碳酸盐岩地热储层。蔡甸地区下古生界碳酸盐岩地层广泛分布,沉积厚度大,岩溶裂隙发育,是周边碳酸盐岩岩溶水汇流区,为岩溶型地热赋存的有利地区。② 较深的热导水通道断裂,特别是深大断裂、活动性断裂能形成局部对流性地热系统。深部的热水顺断裂带上升,浅层的冷水则沿断裂带向下,形成热水-冷水的对流系统。③ 背斜构造。下古生界背斜构造中的碳酸盐岩地层储存着经对流上来的地热水,从而形成储热储水构造。蔡甸地区导水断裂由一条北东向的刘隔断裂和众多北西向逆冲断裂构成,导水条件优越(图3),沟通着地下古生界热储层,地热勘查靶区应选择缺失泥盆-二叠系、钻井开口即现志留系的背斜构造。

7 结语

前期石油勘探资料基本探明地下各类构造形态,武汉多处探井也证实古生界碳酸盐岩为好的地热水储层(武6井、集1井及索河1井等),综合这些

成果,认为:

(1)蔡甸地区地热储层的主要类型为岩溶型热储层,背斜是主要的储水构造,下古生界碳酸盐岩地层为主要目的层。

(2)发育于碳酸盐岩中的裂隙岩溶系统是岩溶水运移、储存的主要通道,襄广断裂断裂及其次级断裂带是岩溶热储地热流体的主要导热导水通道。

(3)蔡甸地区地热资源主控因素为断裂和古生界碳酸盐岩溶储层,地热流体赋存于震旦系-奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶等储层中。

(4)大气降水渗入襄广断裂带控制的一系列北西向展布的冲断断裂形成的裂隙岩溶向深部运移,径流过程中获取围岩的热量,形成地热流体,并沿断裂向上运移,赋存于震旦系-奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶等储层中,形成地热田。

(5)蔡甸地区地热勘查靶区的主要为缺失泥盆-二叠系的背斜构造轴部,已钻成的地热井如集1井、索河1井、武6井等均在此类背斜构造上。

References

- Ding Tongling and Gao He. 2012. Drilling and completion technology for WH-1 ultra-deep geothermal well[J]. *Drilling Engineering*, 39(8): 23~25(in Chinese).
- Fan Wei, Su Cheng, Jiang Yuexiao, *et al.* 2019. Analysis of the geothermal geological conditions of Wuhan city circle[J]. *Resources Environment & Engineering*, 33(4): 547~552(in Chinese with English abstract).
- Guo Pan, Liu Chengxin, Li Peng, *et al.* 2020. Analysis on the occurrence condition and prospect of hot dry rock geothermal resources in Hubei Province[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 27(6): 48~57(in Chinese with English abstract).
- Hu Bin, Zhao Liang, Lei Haifei, *et al.* 2021. Distribution characteristics of geothermal reservoirs in Wumishan Formation, Xiong'an New Area[J]. *Advances in Geosciences*, 10(5): 584~589(in Chinese with English abstract).
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, *et al.* 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2 892~2 901(in Chinese with English abstract).
- Lei Haifei, Li Hongyan, Dai Minggang, *et al.* 2020. Geothermal field features and their control factors in Xiong'an New Area[J]. *Coal Geology of China*, 32(2): 46~50(in Chinese with English abstract).
- Ke Bailin, Lin Tianyi, Li Wen, *et al.* 2019. Genetic model of Gujishan anticline geothermal system and prediction of potential areas in Western Hills of Beijing[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(8): 1 378~1 385(in Chinese with English abstract).
- Li Changhong, Liu Xinmin, Fu Yixing, *et al.* 2008. Tectonic features and evolution of Mesozoic-Paleozoic Jiangnan Plain Region[J]. *Geological Science and Technology Information*, 27(2): 34~38(in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Ye Jiang, Miao Yuan, *et al.* 2016. A preliminary study on the evaluation of geothermal resources in Jiangnan Plain [J]. *Resources Environment & Engineering*, 30(6): 882~894(in Chinese with English abstract).
- Li Wen, Kong Xiangjun, Yuan Lijuan, *et al.* 2020. General situation and suggestions of development and utilization of geothermal resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 229(S1): 22~26(in Chinese).
- Liang Xing, Zhang Renquan, Luo Mingming, *et al.* 2022. Discussion on methodology in research of groundwater flow system; A review of researches on groundwater flow system at CUG-Wuhan[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(1): 30~42(in Chinese with English abstract).
- Liang Xuetang and Zhang Yuanpei. 2016. Comprehensive Research Report on Geophysics and Deep Geology in Hubei Province[R]. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau (in Chinese).
- Luo Xiaojie. 2013. On the history of tectonic evolution and karstification in Wuhan[J]. *Carsologica Sinica*, 32(2): 195~202(in Chinese with English abstract).
- Niu Junqiang, Li Rong, Jiang Yuexiao, *et al.* 2019. Study on the model of medium-deep geothermal resources in Wuhan City[J]. *Resources Environment & Engineering*, 33(4): 530~535(in Chinese with English abstract).
- Sheng Xiancai and Guo Zhanfeng. 2011. Characteristics and geologic implication of fluid inclusions of Carboniferous Huanglong Formation in well Paishen 1, Jiangnan Plain[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(6): 652~656.
- Sowizdal A. 2018. Geothermal energy resources in Poland—Overview of the current state of knowledge[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82: 4 020~4 027.
- Tan Shuang, Chen Qi, Wang Andong, *et al.* 2021. Radioactive geochemi-

- cal characteristics of rocks from Douzhashan pluton in northern Guangxi and its implications for hot dry rock resources[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(3): 501~512 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zhonghua, Wang Wei and Liu Pinghua. 2022. Late Neoproterozoic tectonic evolution in eastern China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(4): 681~694 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, *et al.* 2020. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, *et al.* 2017b. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 8(4): 449~459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Luan Wenjing, *et al.* 2018. Progress of national geothermal resources investigation, evaluation and exploration demonstration project[J]. *Geological Survey of China*, 5(2): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, *et al.* 2017a. 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 Jiyang. 2015. *Geothermy and Its Application* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Xiong Liangping and Zhang Juming. 1988. Relationship between geothermal gradient and the belief rock in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 31(2): 146~155 (in Chinese with English abstract).
- Yi Yang, Yang Fei, Wang Shun, *et al.* 2021. Identification and application of karst traps in Longwangmiao Formation, Ziyang Area, Western Sichuan[J]. *Science Technology and Engineering*, 21(13): 5296~5304 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dezhong, Liu Zhigang and Lu Hongliu. 2013. *Geothermal in Hebei* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, *et al.* 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 46(2): 255~268 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zidong and Yang Yi. 2020. Demonstration Project for Deep Geothermal Exploration in Wuhan Multi element Urban Geological Survey [R]. Wuhan: The Seventh Geological Brigade of Hubei Provincial Geological Bureau (in Chinese).
- Zhu Jianjiang, Liu Fulai and Zhang Lifei. 2022. Carbon cycle in the early Earth and the great oxidation event[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(2): 396~412 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Qingbo, Cheng Wanqiang and Zhou Quan. 2022. Deformation characteristics and evolution of the eastern Xiangfan-Guangji fault zone [J]. *Geoscience*, 36(3): 755~768 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁同领, 高嵩. 2012. 武汉-1超深地热井钻井成井工艺[J]. *探矿工程*, 39(8): 23~25.
- 范威, 苏呈, 江越潇, 等. 2019. 武汉城市圈地热地质条件分析[J]. *资源环境与工程*, 33(4): 547~552.
- 郭盼, 刘成新, 李朋, 等. 2020. 湖北省干热岩地热资源赋存条件及远景分析[J]. *安全与环境工程*, 27(6): 48~57.
- 胡斌, 赵亮, 雷海飞, 等. 2021. 雄安新区雾迷山组地热储层分布特征[J]. *地球科学前沿*, 10(5): 584~589.
- 姜光政, 高珊, 饶松, 等. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 59(8): 2892~2901.
- 雷海飞, 李红岩, 戴明刚, 等. 2020. 雄安新区地温场特征及其控制因素[J]. *中国煤炭地质*, 32(2): 46~50.
- 柯柏林, 林天懿, 李文, 等. 2019. 北京西山谷积山背斜地热系统成因模式及远景区预测[J]. *地质通报*, 38(8): 1378~1385.
- 李昌鸿, 刘新民, 付宜兴, 等. 2008. 江汉平原区中、古生界构造特征及演化[J]. *地质科技情报*, 27(2): 34~38.
- 李伟, 叶疆, 廖媛, 等. 2016. 江汉平原地热资源评价的初步研究[J]. *资源环境与工程*, 30(6): 882~894.
- 李文, 孔祥军, 袁利娟, 等. 2020. 中国地热资源概况及开发利用建议[J]. *中国矿业*, 29(S1): 22~26.
- 梁杏, 张人权, 罗明明, 等. 2022. 地下水流系统研究中的方法论探讨: 以CUG-武汉地下水流系统研究为例[J]. *地质科技通报*, 41(1): 30~42.
- 梁学堂, 张元培. 2016. 湖北省地球物理与深部地质综合研究报告[R]. 武汉: 湖北省地质局地球物理勘探大队.
- 罗小杰. 2013. 试论武汉地区构造演化与岩溶发育史[J]. *中国岩溶*, 32(2): 195~202.
- 牛俊强, 李嵘, 江越潇, 等. 2019. 武汉市中深层地热赋存模式研究[J]. *资源环境与工程*, 33(4): 530~535.
- 盛贤才, 郭战峰. 2011. 江汉平原深1井石炭系黄龙组流体包裹体特征及其地质意义[J]. *石油实验地质*, 33(6): 652~656.

- 谭双,陈琪,王安东,等. 2021. 桂北豆仵山岩体放射性地球化学特征及其干热岩资源潜力研究[J]. 岩石矿物学杂志, 40(3): 501~512.
- 田忠华,王伟,刘平华. 2022. 中国东部新太古代末期构造演化[J]. 岩石矿物学杂志, 41(4): 681~694.
- 王贵玲,刘彦广,朱喜,等. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27(1): 1~9.
- 王贵玲,张薇,梁继运,等. 2017b. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449~459.
- 王贵玲,张薇,蔺文静,等. 2017a. 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.
- 王贵玲,张薇,蔺文静,等. 2018. 全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展[J]. 中国地质调查, 5(2): 1~7.
- 汪集旻. 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 熊亮萍,张菊明. 1988. 华北平原区地温梯度与基底构造形态的关系[J]. 地球物理学报, 31(2): 146~155.
- 易杨,杨飞,王顺,等. 2021. 川西资阳地区龙王庙组岩溶圈闭识别方法及应用[J]. 科学技术与工程, 21(13): 5296~5304.
- 张德忠,刘志刚,卢红柳. 2013. 河北地热[M]. 北京: 地质出版社.
- 张薇,王贵玲,刘峰,等. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2): 255~268.
- 赵子栋,杨怡. 2020. 武汉市多要素城市地质调查中深层地热勘查示范项目[R]. 武汉: 湖北省地质局第七地质大队.
- 朱建江,刘福来,张立飞. 2022. 地球早期碳循环与大氧化事件[J]. 岩石矿物学杂志, 41(2): 396~412.
- 朱清波,程万强,周全. 2022. 襄樊—广济断裂带东段构造变形特征及其演化[J]. 现代地质, 36(3): 755~768.