

doi: 10.12097/gbc.2022.12.015

关中盆地新近系蓝田-灞河组热储层物性及渗流特征研究

张莹^{1,2}, 任战利^{1,2,3*}, 兰华平^{1,2}, 祁凯^{1,2}, 邢光远^{1,2}, 夏岩^{4,5}

ZHANG Ying^{1,2}, REN Zhanli^{1,2,3*}, LAN Huaping^{1,2}, QI Kai^{1,2}, XING Guangyuan^{1,2}, XIA Yan^{4,5}

1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

3. 西安市多种能源资源勘探开发重点实验室, 陕西 西安 710069;

4. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018;

5. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

3. Key Laboratory of Exploration and Development of Multiple Energy Resources, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

4. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, Shaanxi, China;

5. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an 710018, Shaanxi, China

摘要: 关中盆地地热资源丰富, 开发利用地热能有助于调整能源结构、降低雾霾及改善环境。新近系蓝田-灞河组是目前地热开采的主要热储层, 明确储层物性及渗流机理对地热资源的高效规模开发利用及回灌具有重要意义。通过钻井岩心及测井资料, 结合压汞、铸体薄片、核磁共振等相关测试手段, 对渭河盆地新近系主要层位蓝田-灞河组的物性特征、孔隙结构特征、渗流特征进行了详细分析。研究结果表明: ①基于地热井及钻孔测井资料, 西安凹陷蓝田-灞河组孔隙度为 20%~25%, 渗透率为 100~200 mD, 固市凹陷孔隙度为 10%~20%, 渗透率为 1~100 mD, 西安凹陷物性条件优于固市凹陷, 在平面上孔渗均表现为由盆地边缘向盆地中部增大的趋势。②蓝田-灞河组孔隙以原生粒间孔、粒间残余孔隙为主, 局部见少量微裂缝发育, 见少量长石溶孔。孔喉分布比较均匀, 主要介于 10~16 μm 之间, 渗透率贡献值高。出水量大, 单位厚度砂岩单位涌水量高, 富水性及渗流特征好。③蓝田-灞河组砂岩储层类型属于 II 类储集层, 综合评价为高孔隙度渗透层, 是最有利的地热开发层段。

关键词: 热储层; 孔隙结构; 渗流; 蓝田-灞河组; 地热资源; 关中盆地

中图分类号: P314; P534.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)05-0712-14

Zhang Y, Ren Z, Lan H P, Qi K, Xing G Y, Xia Y. Physical properties and percolation characteristics of Neogene Lantian-Bahe Formation thermal reservoir in Guanzhong Basin. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 712-725

Abstract: Guanzhong Basin is rich in geothermal resources, and its development and utilization will help to adjust the energy structure, reduce haze and improve the environment. The Neogene Lantian-Bahe Formation is the main stratum exploited at present. It is of great significance for effective development and reinjection of geothermal energy to clarify reservoir physical properties and seepage mechanism. Through core data and logging data, combined with mercury injection, casting thin section, nuclear magnetic resonance

收稿日期: 2022-12-14; 修订日期: 2023-01-26

资助项目: 国家重点研发计划《未固结砂岩热储层保护与增效钻井技术及材料》专题《不同地区典型未固结砂岩热储层特征及评价》(编号: 2019YFB1504201-01)、长庆油田分公司勘探开发研究院合作项目《关中盆地地热资源调查及开发技术政策研究》

作者简介: 张莹(1997-), 女, 硕士, 从事地热储层评价相关研究。E-mail: 1085866609@qq.com

* 通信作者: 任战利(1961-), 男, 教授, 从事盆地热演化史与油气评价、地热资源评价与开发研究。E-mail: renzhanli@nwu.edu.cn

and other related testing methods, the physical property, pore structure and seepage characteristics of the Neogene Lantian-Bahe Formation in the Weihe Basin are analyzed in detail. The results show that: ①The porosity in the plane of Lantian Bahe Formation is 7%~30%, with an average of 15%; permeability changes greatly, 0.05~5689 mD, generally more than 30 mD. ②The pores of Lantian-Bahe Formation are mainly primary intergranular pores and intergranular residual pores, with a small amount of microcracks and feldspar dissolution pores can be seen locally. The pore throat distribution is relatively uniform, mainly between 10 and 16 μm . The contribution value of permeability is high. The water yield can reach 80 m^3/h , and the unit water inflow of sandstone with unit thickness can reach 0.0035 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ with good water yield and seepage characteristics. ③The reservoir type of Lantian-Bahe Formation belongs to Class II reservoir, which is comprehensively evaluated as high porosity permeable layer, and is the most favorable geothermal development interval.

Key words: thermal reservoir; pore structure; seepage; Lantian-Bahe Formation; geothermal resources; Guanzhong Basin

地热资源是一种清洁可再生的能源资源, 开发利用地热能替代化石能源, 对保护环境, 优化能源结构等可以发挥重要的作用(周阳等, 2017)。关中盆地具有非常丰富的地热资源, 开发潜力大, 加快关中盆地地热能的开发及使用能够改善环境、降低雾霾, 对助力实现碳中和、碳达峰目标具有指导性的意义(张莹等, 2023)。

关中盆地蕴藏着巨大的地热能, 其具有清洁环保、分布广、可再生的优势(卫万顺等, 2010; 周阳等, 2016; 褚庆国等, 2019)。地热能具有一定的开发利用价值(隋学文等, 2011; 周阳等, 2017), 可用于供暖、温泉、洗浴、养殖等方面。为有效开发利用关中盆地地热能, 诸多学者已经对关中盆地的盆地结构、地热地质特征、地温场、成因等进行了深入研究(汪集旻等, 1986, 2001; 蔺文静等, 2013; 李智超等, 2015; 孙红丽, 2015; 姜光政等, 2016; 李修成等, 2016; 饶松等, 2016; 周阳等, 2016, 2017; 任战利等, 2020; 王贵玲等, 2020; 黄建军等, 2021; 刘润川等, 2023), 均取得了一定的成果, 认为关中盆地地温梯度平均值为 3.5 $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 地热田主要呈层状分布, 地热的传递方式为热传导和热对流, 且以热传导为主, 但关中盆地新近系热储层物性及渗流特征研究方面的相关研究鲜有报道。关中盆地储层特征及渗流特征不仅直接影响地热开采井的水量情况, 而且对地热水的回灌至关重要(何满潮等, 2004; 王学鹏等, 2020; Zhang et al., 2022)。

本文在前人研究基础上, 通过岩心资料及测井资料, 结合压汞、铸体薄片、核磁共振等测试手段, 对关中盆地新近系主要层位蓝田-灞河组的物性特征、孔隙结构特征、渗流特征进行了详细分析, 并对新近系蓝田-灞河组热储层进行了综合评价。研究结果

可为制定关中盆地地热资源勘探开发规划、推进地热资源科学开发利用提供科学依据。

1 区域地热地质概况

1.1 地质构造背景

关中盆地位于陕西省中部, 南依秦岭, 北连黄土高原, 西起宝鸡, 东至潼关, 为新生代东西向狭长断陷盆地。构造形态呈南部向北陡倾、北部向南缓倾的不对称阶梯状(谷天峰等, 2007; 周阳等, 2017; 张健等, 2021)。

关中盆地位于鄂尔多斯盆地与秦岭造山带之间, 太古宇—新生界均有发育, 盆地基底由前新生界及花岗岩构成, 并出露于盆地边缘, 中部沉积新生界, 沉积厚度大(任战利等, 2020, 2022)。关中盆地是燕山期隆起、喜马拉雅期陷落、三面环山向东敞开的断陷盆地, 东部与山西盆地、灵宝盆地和三门峡盆地共同组成汾渭地堑系。以渭河断裂为界, 盆地北部为斜坡带, 基底主要为古生界碳酸盐岩和中生界沉积岩; 南部为坳陷区, 基底主要为太古宇、元古宇、下古生界变质岩及中生代花岗岩体, 这些花岗岩体对于深部高热流的形成有一定影响(王全庆等, 1990; 彭建兵, 1992; 韩恒悦等, 2002; 李荣西等, 2009; 董敏等, 2017; 刘林等, 2018; 唐瑞等, 2018)。以长安-临潼断裂为界, 其以东基底为太古宇变质岩区, 以西基底为元古宇、下古生界变质岩区。盆地沉积的巨厚新生代盖层被不同方向、不同级别、不同规模的断裂分割成大小不等、结构不同的断隆和断陷, 可划分为宝鸡凸起、咸礼凸起、西安凹陷、临蓝凸起、固市凹陷、蒲城凸起 6 个地质构造单元(洪增林等, 2019; 任战利等, 2023)(图 1-a)。关中盆地断裂构造极其发育(图 1-b), 主要的控热断裂有秦岭山前

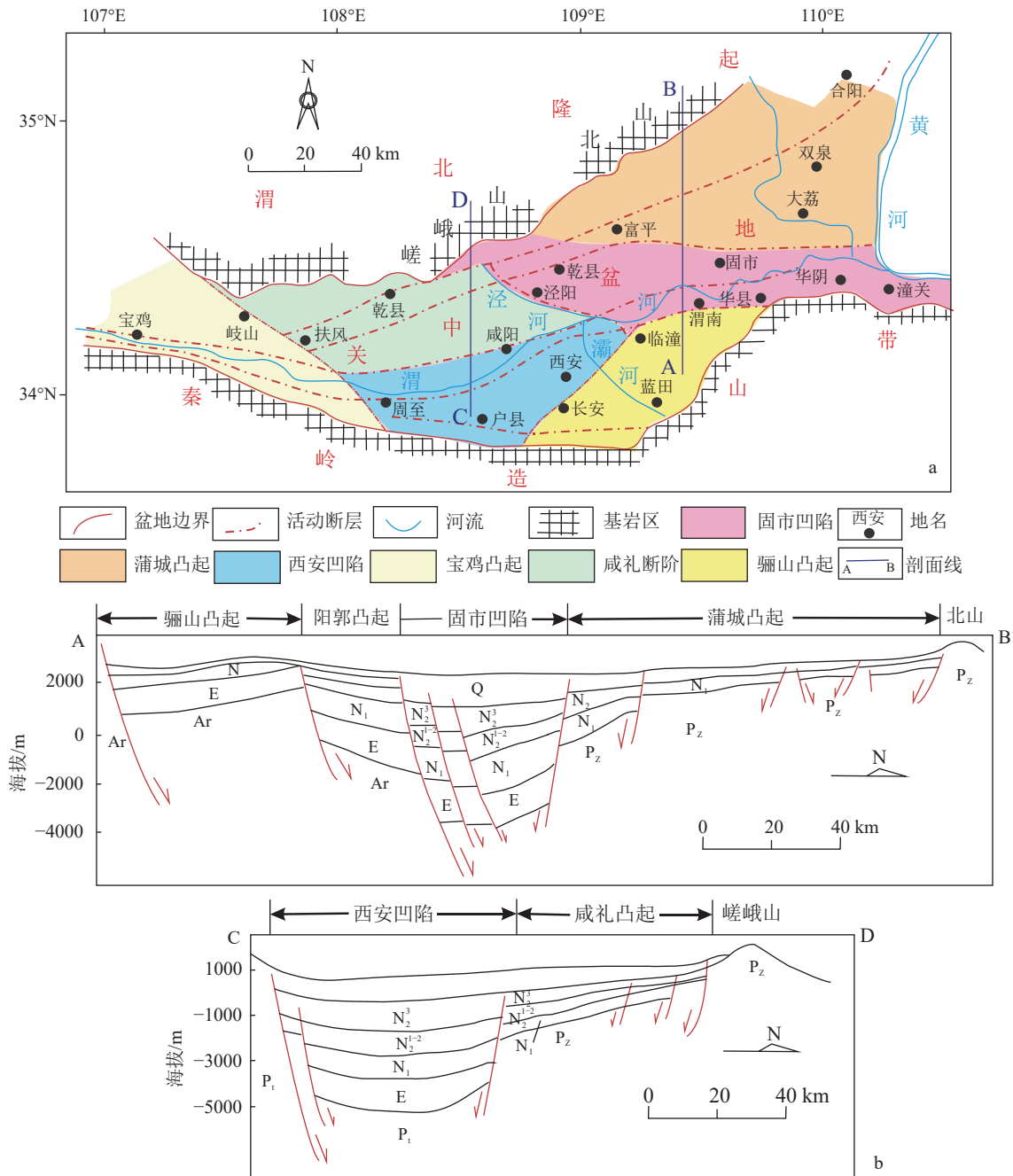


图1 关中盆地构造单元划分(a)和构造剖面(b)(据饶松, 2016 修改)

Fig. 1 Structural unit division(a) and construction sections(b) of Guanzhong Basin

Ar—太古宇; Pt—元古宇; Pz—中生界; E—古近系; N—新近系; N₁—新近系高陵群; N₂¹⁻²—新近系蓝田—灞河组; N₂³—新近系张家坡组; Q—第四系

大断裂、余下-铁炉子断裂、华山山前断裂、渭河断裂、长安-临潼断裂, 地热水的补给来源及径流受这些深大断裂的控制, 特别是渭河断裂及临潼-长安断裂主要影响地热流体的赋存特征及流体性质。

关中盆地主要热源为上地幔热源, 在西安凹陷和固市凹陷莫霍面埋深较浅(张雪, 2015)。深部地

热能向上覆新生界沉积层扩散, 在断裂处通过构造贯通向浅部快速传递, 形成良好的深部热背景 (Artemieva et al., 2001; Pan et al., 2014; Tang et al., 2015; Qu et al., 2017)。其次为地壳中放射性元素衰变及矿物转化过程中产生的热能, 同时生物降解的有机质热能也可作为补充能源(周阳等, 2017)。

1.2 蓝田-灞河组地质特征

1.2.1 纵向地层分布特征

前人对关中盆地区域地层分布特征进行了研究(李祥根等, 1983), 关中盆地新生界的地层厚度由北向南逐渐变厚, 岩性分布不一, 古近系多深埋于关中盆地之下, 地表出露于骊山地区, 主要呈扇状分布于骊山周围, 自骊山向外掩埋于平原之下, 其上被第四系松散层覆盖。下部为泥岩, 上部为砂岩, 主要为残积层; 新近系分布于白鹿塬、同仁塬、横岭塬及骊山周边地区, 大多数掩埋于盆地之下, 其上被第四系松散层覆盖, 仅在盆地周边深切沟谷及山地边缘可见, 主要层位有张家坡组、蓝田-灞河组、高陵群, 岩性主要为砂岩、泥岩、砂泥岩不等厚互层, 砂岩层段为

关中盆地新近系主要热储层, 开采较多的层位为蓝田-灞河组, 岩性主要为褐色、灰色泥岩与浅灰色粗砂岩呈略等厚—不等厚互层, 砂岩层段较厚, 上部张家坡组底部的泥岩可作为蓝田-灞河组热储层良好的盖层, 起到保温作用, 为蓝田-灞河组疏松的砂岩提供良好的储水储热功能, 深部地壳、岩石圈、中生界及古生界为新近系蓝田-灞河组提供了充足的热源; 第四系广布全区, 以风积、冲洪积、湖积为主, 另有冰水、坡积、滑塌等, 以黄土和砂砾卵石为主。由于原始地形崎岖不平, 第四系沉积物厚度差别极大, 由西北向东南增厚(图 2)。

1.2.2 砂体平面展布特征

蓝田-灞河组沉积期, 随着盆地断陷加剧, 水体

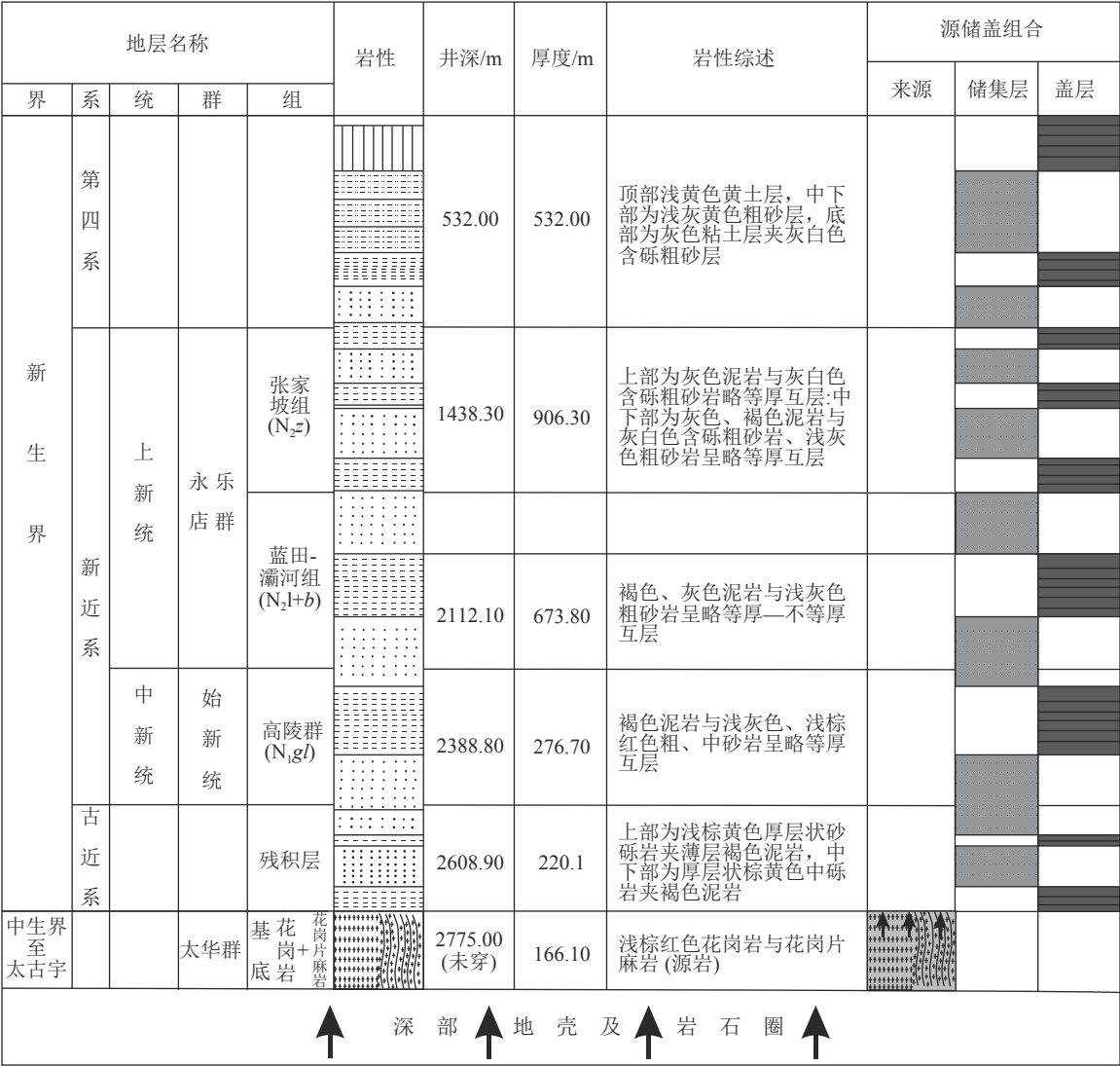


图 2 关中盆地热源储盖组合图

Fig. 2 Heat source reservoir-cap combination in Guanzhong Basin

的快速扩张,湖盆向外扩展,向北超过乾县富平一线,以礼泉-蒲城断裂为界,向西越过哑柏断裂到达宝鸡、眉县地区,南部厚度大,向北减薄,此时渭河盆地沉积范围达到最大。蓝田-灞河组总体为冲积扇-河流-三角洲-湖泊的沉积体系特征。秦岭和渭北隆起为盆地南、北主要物源,蓝田-灞河组砂体厚度处于 150~600 m 之间,部分井显示砂厚大于 600 m,盆地南部 WS10 井区和东部的 WS12 井区砂厚最厚可达 600 m 以上,合阳附近砂厚也偏高,高达 350 m,砂厚总体呈现盆地边缘大、盆地中心小的分布特征(图 3)。

2 储层物性特征

2.1 孔渗总体特征

基于地热井及钻孔测井资料,对西安凹陷蓝田-灞河组 115 个孔隙度、渗透率样品进行统计(其中 SY1 井 15 个样品、YR1 井 42 个样品、WYDX 井 58 个样品),其孔隙度最大值为 36.32%,最小值为 8.46%,平均值为 22.13%。西安凹陷蓝田-灞河组的孔隙度主要分布在 20%~30% 之间,其中 20%~25% 占样品总数的 52.17%,25%~30% 占样品总数的 19.13%(图 4-a)。渗透率最大值为 396.74 mD,最

小值为 2.68 mD,平均值为 156.21 mD(图 4-b),SY1 井蓝田-灞河组渗透率主要为 0~100 mD,其中分布在 0~50 mD 之间的样品占 SY1 井样品总数的 46.67%,YR1 井蓝田-灞河组渗透率主要为 150~250 mD,其中分布在 200~250 mD 之间的样品数量最多,可占 YR1 井样品总数的 50%,WYDX 井渗透率主要分布在 100~50 mD 之间,占其样品总数的 39.66%(图 4-b)。按照不同井样品所占比重,西安凹陷蓝田-灞河组孔隙度主要分布于 20%~25% 之间,渗透率分布于 100~200 mD 之间。

基于地热井及钻孔测井资料,对固市凹陷蓝田-灞河组 286 个孔隙度、渗透率样品进行统计(其中 R1 井 58 个样品,051-JD 井 70 个样品,HX1 井 53 个样品,HX2 井 49 个样品,FHNB 井 43 个样品,P1 井 13 个样品),其孔隙度最大值为 43.56%,最小值为 3.3%,平均值为 19.74%。R1 井、FHNB 井及 051-JD 井的蓝田-灞河组孔隙度较小,主要分布在 0~20% 之间,R1 井蓝田-灞河组孔隙度主要分布在 0~10% 区间,FHNB 井和 051-JD 井主要分布在 10%~20% 之间。而 HX1、HX2 井及 P1 井蓝田-灞河组孔隙度较高,分布在 20%~30% 之间(图 4-c)。固市凹陷渗透率最大值为 1085.2 mD,最小值为 0.1 mD,平均值为 53.65 mD。

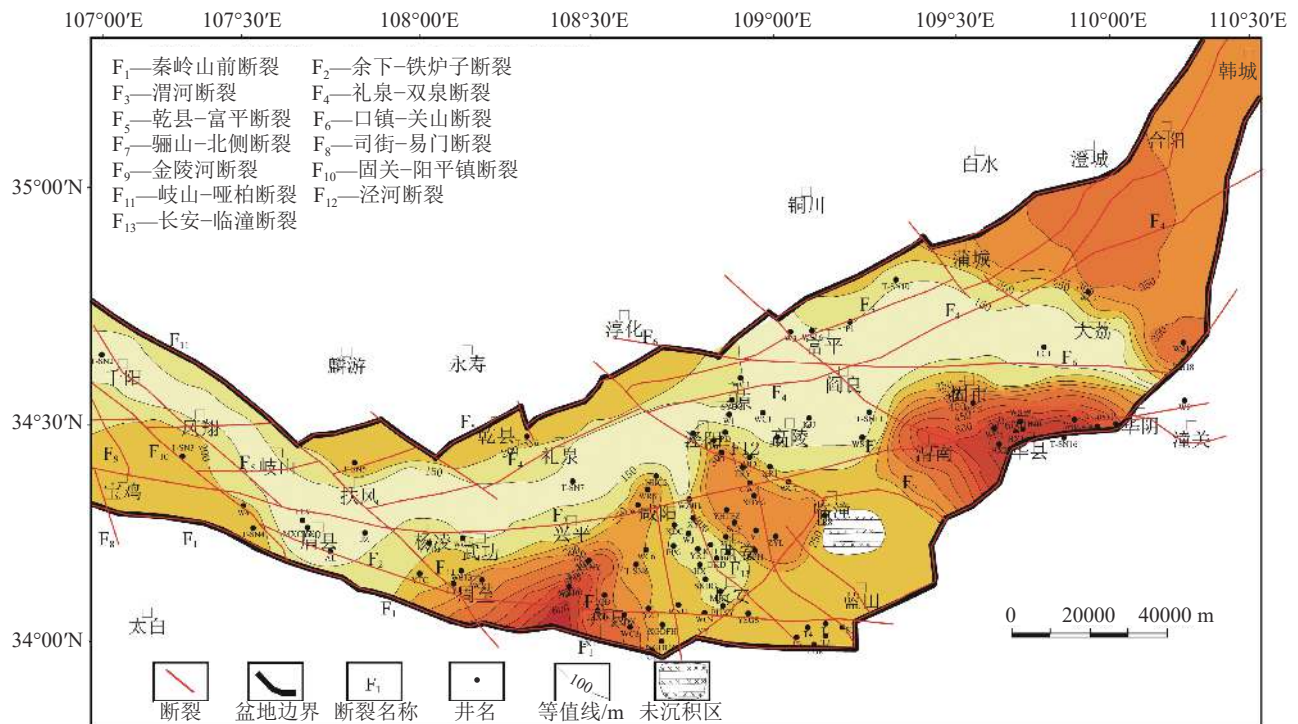


图 3 关中盆地蓝田-灞河组砂体厚度图

Fig. 3 Thickness map of sand body in Lantian-Bahe Formation of Guanzhong Basin

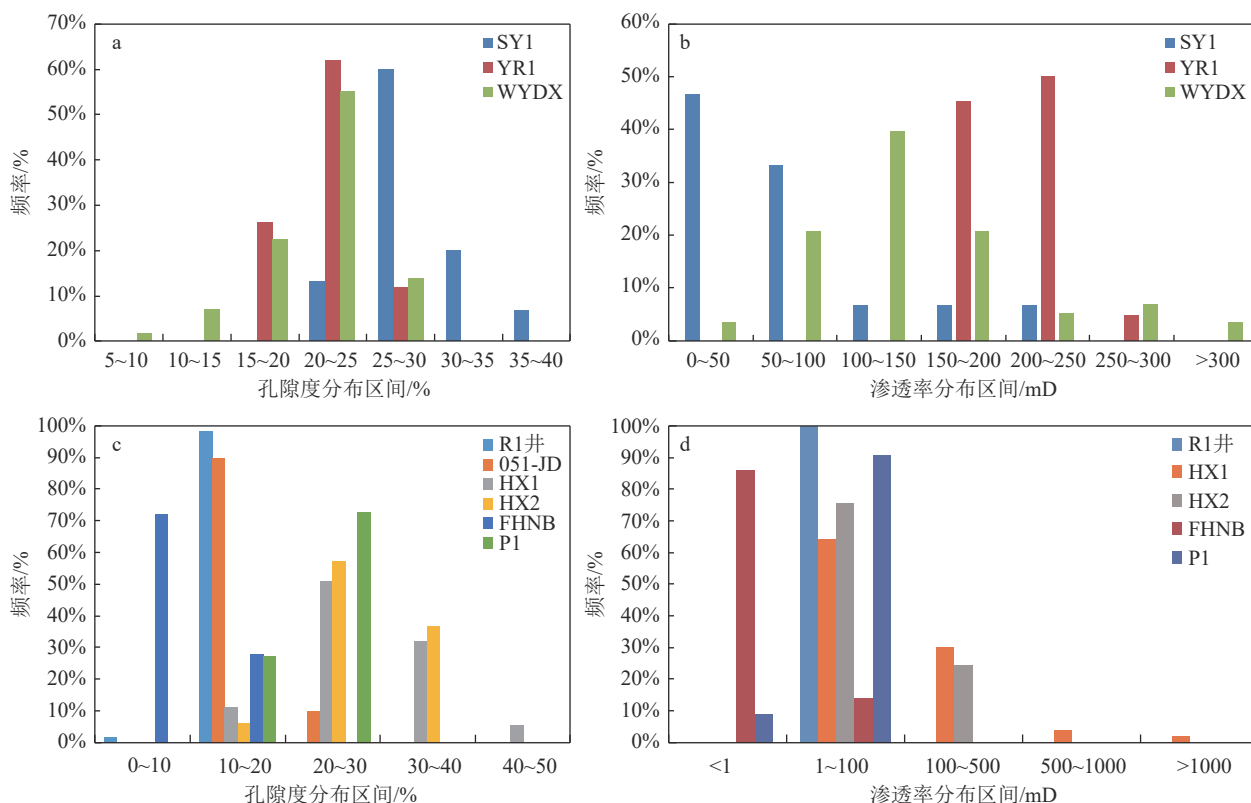


图 4 关中盆地蓝田-灞河组物性分布图

Fig. 4 Physical property distribution maps of Lantian-Bahe Formation in Guanzhong Basin

a—西安凹陷孔隙度分布直方图; b—西安凹陷渗透率分布直方图; c—固市凹陷孔隙度分布直方图; d—固市凹陷渗透率分布直方图

FHNB 井蓝田-灞河组的渗透率较低, 主要小于 1 mD, 其他井蓝田-灞河组的渗透率主要为 1~100 mD (图 4-d)。总体而言, 固市凹陷孔隙度主要为 10%~20%, 渗透率主要为 1~100 mD。

2.2 孔渗组合类型

从西安凹陷蓝田-灞河组储层孔隙度与渗透率关系图(图 5-a)看, 渗透率具有随孔隙度增大而逐渐增大的变化规律。孔隙度小于 20% 时, 渗透率随孔隙度增加而增加, 但渗透率增加速度较慢。孔隙度大于 20% 时, 渗透率随孔隙度增加而增加, 但渗透率的增加速度变快。由图 5-a 可知, 大部分样品的孔隙度处于 20%~25% 之间, 其对应的渗透率处于 100~200 mD 之间。

从固市凹陷蓝田-灞河组储层孔隙度与渗透率关系图(图 5-b)看, 渗透率具有随孔隙度增大而逐渐增大的变化趋势。孔隙度小于 10% 时, 渗透率随孔隙度增加而增加, 渗透率增加较慢。在孔隙度大于 10% 时, 渗透率随孔隙度增加而增加。由图 5-b 可知, 大部分样品的孔隙度处于 10%~20% 之间, 其对

应的渗透率为 0~100 mD。

通过西安凹陷与固市凹陷蓝田-灞河组孔渗对比得知, 西安凹陷蓝田-灞河组总体孔渗分布情况好于固市凹陷蓝田-灞河组孔渗, 且西安凹陷孔渗均高于固市凹陷。

2.3 孔渗平面特征

平面上, 蓝田-灞河组下部单砂层厚度一般为 2 m, 最厚达 60 m。孔隙度为 7%~30%, 平均 15% 左右; 渗透率变化较大, 为 0.05~5689 mD, 一般在 30 mD 以上, 储集性能优异。西安凹陷发育河湖相沉积, 其储层厚度、粒度、物性、单层出水量均较高, 围绕 2 个次级凹陷分布的区域孔隙度大于 10%(图 6), 平均渗透率多大于 100 mD(图 7)。固市凹陷以湖相为主, 储层多为湖相砂岩, 岩性多为细粉砂岩, 宏观上砂层发育、单层厚度大、物性差异大, 尽管平均孔隙度多在 5% 以上, 但平均渗透率明显低于西安凹陷。基于岩心样品孔隙度测试, 在平面上, 西安凹陷孔隙度处于 15%~30% 之间, 在长安一户县一带达 30%; 渗透率处于 50~600 mD 之间, 在长安可达 600 mD;

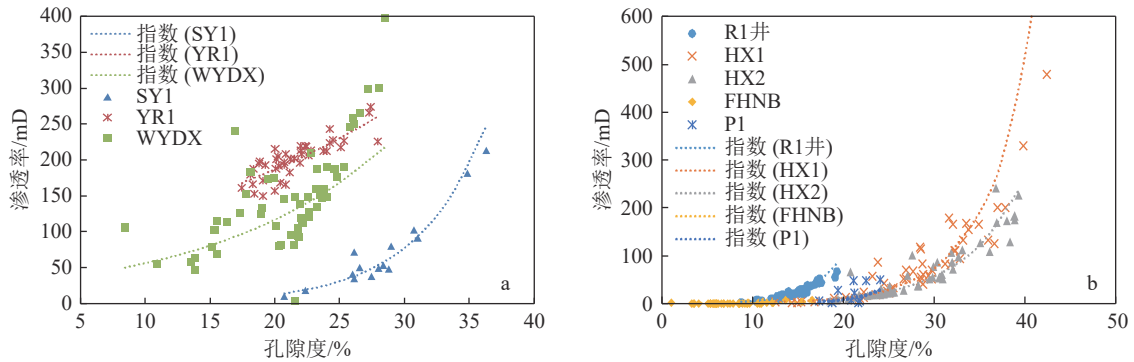


图5 关中盆地蓝田-灞河组孔渗关系图

Fig. 5 Porosity and permeability relationship of Lantian-Bahe Formation in Guanzhong Basin

a—西安凹陷蓝田-灞河组孔渗关系图; b—固市凹陷蓝田-灞河组孔渗关系图

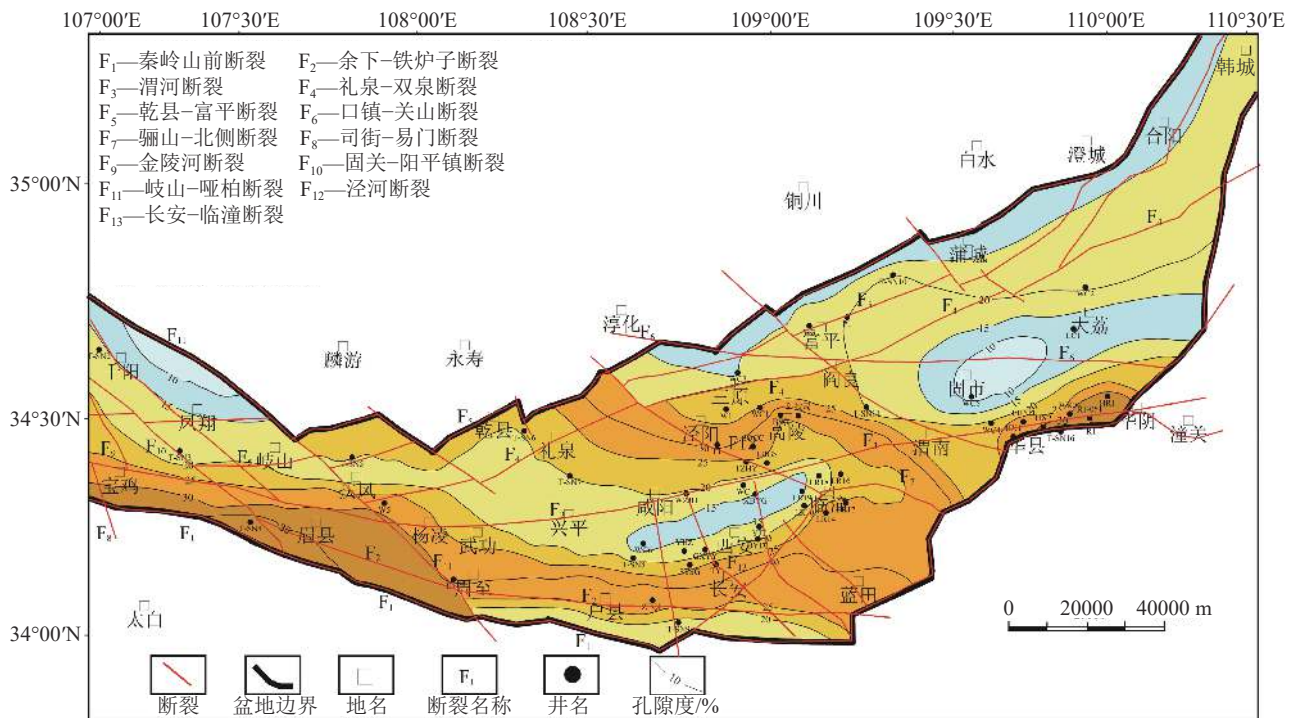


图6 蓝田-灞河组孔隙度平面分布图

Fig. 6 Porosity plan of Lantian-Bahe Formation

固市凹陷孔隙度处于 10%~30% 之间,在华县—华阴一带达 25%~30%;渗透率处于 10~50 mD 之间,在华县—华阴一带达 50 mD;北部斜坡孔隙度处于 15%~20% 之间,渗透率处于 10~200 mD 之间;南部凹陷孔隙度处于 20%~25% 之间,渗透率处于 600~2000 mD 之间;在临潼—蓝田一带渗透率较高。

3 孔喉结构特征

3.1 微观孔隙结构特征

蓝田-灞河组上部岩性为紫红色巨厚含钙质结

核泥岩及砂质泥岩,下部以数十层中细粒砂岩为主,夹粘土岩。蓝田-灞河组顶部主要为紫红色细砂岩、粉砂岩(图 8-a,b),底部岩性主要为灰色粗砂岩、灰白色细砂岩(图 8-c,d)。

蓝田-灞河组热储层砂岩孔隙以原生粒间孔、粒间残余孔隙为主(图版 I-a,b),局部见少量微裂缝及长石溶孔,成岩自生矿物由片状伊利石等粘土矿物组成,多呈孔隙充填产出,岩石孔隙发育好。矿物成分主要由泥质、石英、长石组成。泥质成分约占 65%。石英颗粒以粗粉砂为主,粒径为 0.03~

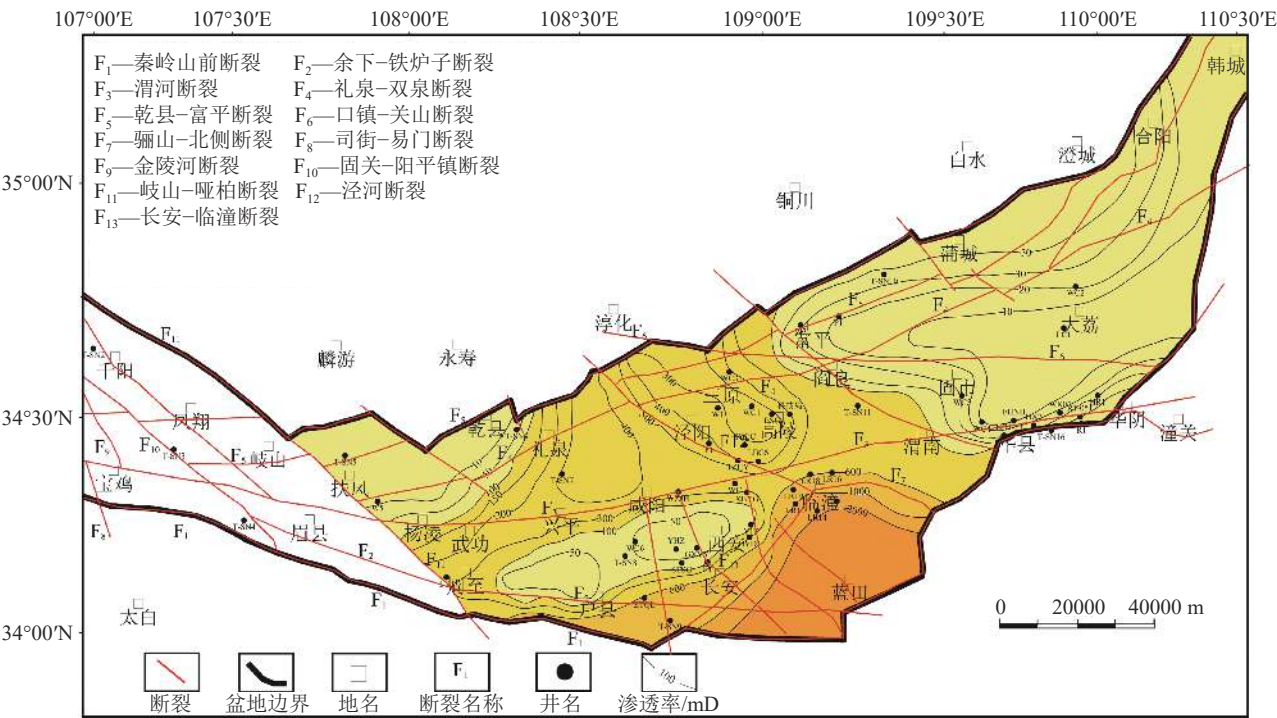


图 7 蓝田-灞河组渗透率平面分布图

Fig. 7 Plane distribution of permeability of Lantian-Bahe Formation



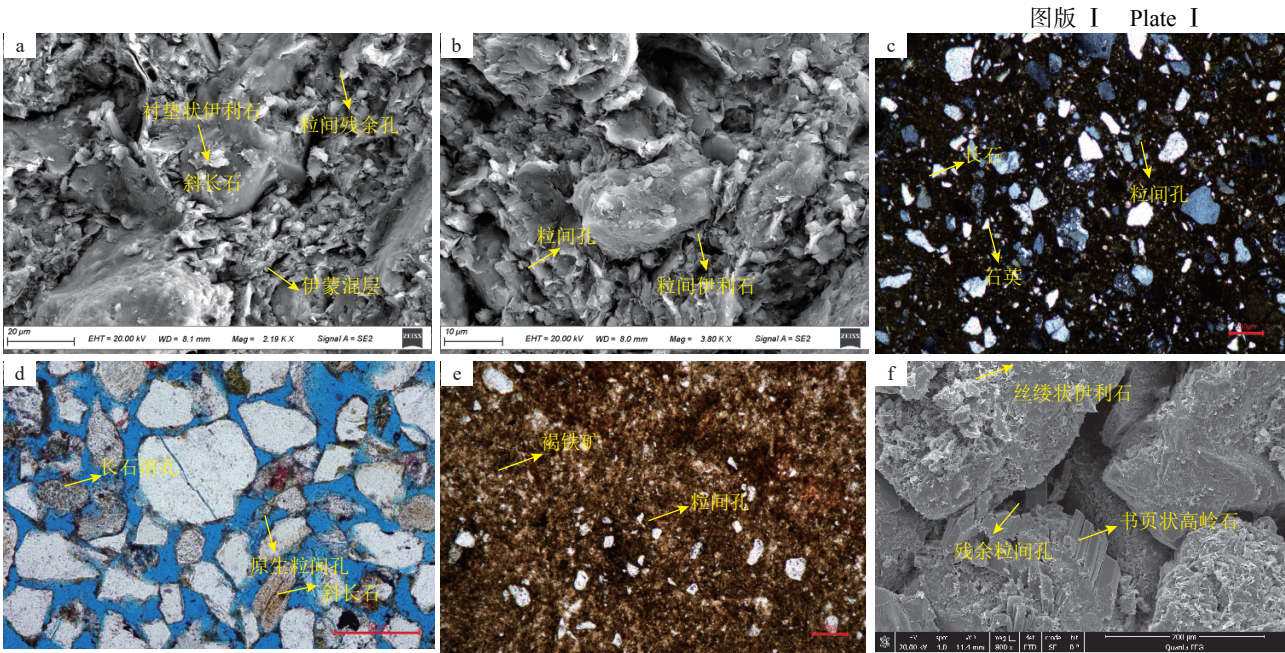
图 8 关中盆地蓝田-灞河组岩心照片

Fig. 8 Core photos of Lantian-Bahe Formation in Guanzhong Basin

a—P1 井, 细砂岩; b—P1 井, 粉砂岩; c—SY1 井, 粗砂岩; d—SY1 井, 细砂岩

0.6 mm, 其中极细粒砂粒径为 0.06~0.12 mm, 少量细粒砂粒径为 0.12~0.25 mm; 石英颗粒分选性差、磨圆为次圆一次棱角状; 含量约占 30%。长石以聚片双

晶斜长石为主, 含量约占 2%。泥质绝大部分已重结晶为水云母类矿物, 部分仍呈隐晶质集合体分布于水云母之间, 水云母在镜下呈鳞片状、毛毡状均匀分



a. P 1 井: 细砂岩, 扫描电镜下的粒间充填、粒表衬垫状伊利石、伊蒙混层等粘土矿物及粒间残余孔隙; b. P1 井: 细砂岩, 扫描电镜下的粒间伊利石等粘土矿物、细碎屑填隙物及粒间孔缝; c. P1 井: 粉砂岩, 铸体薄片下的砂质泥质结构; d. JT1 井: 粗砂岩, 铸体薄片下的粒间孔;
e. P1 井: 粉砂岩, 普通薄片下的含砂泥质结构; f. SY1 井: 细砂岩, 扫描电镜下的书页状高岭石和丝缕状伊利石形成的残余粒间孔

布(图版 I -c, d)。蓝田-灞河组以细粒砂质结构为主, 见少量中粒砂。岩石长轴略具定向排列, 风化蚀变程度浅。岩石成分主要为石英、岩屑、长石。局部见不等厚绿泥石薄膜呈断续状围绕颗粒; 岩石内见赤褐铁矿呈团块状、不规则状分布; 少量粘土围绕颗粒分布。砂岩孔隙主要为粒间孔, 砂岩孔隙发育好(图版 I -e)。在扫描电镜下, 可见书页状高岭石和丝缕状伊利石形成的残余粒间孔(图版 I -f)。

本文选取关中盆地蓝田-灞河组 2 块砂岩样品进行压汞实验测试(宋磊等, 2017; 程辉等, 2020; 孔星星等, 2020; 王伟等, 2021), 基本参数平均值见表 1。LT-2 样品, 孔隙度为 25.92%, 孔隙体积为 2.544 cm³, 渗透率为 4853 mD, 排驱压力为 0.023 MPa, 最大连通半径为 31.957 μm, 中值压力为 0.067 MPa, 中值孔喉半径为 10.935 μm, 平均孔喉半径为 9.857 μm, 退汞效率达 80.18%。LT-5 样品, 孔隙度为 27.84%, 孔隙体积为 3.504 cm³, 渗透率为 393 mD, 排驱压力

为 0.058 MPa, 最大连通半径为 12.672 μm, 中值压力为 0.129 MPa, 中值孔喉半径为 5.677 μm, 平均孔喉半径为 9.857 μm, 退汞效率达 76.13%。通过分析蓝田-灞河组的压汞曲线形态及孔径分布特点(图 9、图 10), LT-2 样品孔径主要介于 10~16 μm 之间, 渗透率贡献值高, LT-5 样品孔径主要介于 6~10 μm 之间, 渗透率贡献值高。

利用进汞曲线(图 10)可以得到砂岩孔喉分布曲线(图 11)。砂岩孔喉分布范围为 0.01~100 μm, 其中孔喉半径 4~63 μm 所占孔喉分布频率较高, 渗透率的贡献值也较大。孔喉分布曲线呈单峰型, 显示孔喉分布主要集中在 10~100 μm 之间, 单峰型砂岩孔喉分布非均质性较弱。

综合储层物性及多个高压压汞实验参数, 对储层孔隙结构进行分区分类评价。总体上, 蓝田-灞河组孔隙结构好, 孔隙类型较发育。均值系数愈趋于 1, 孔喉分布越均匀, 蓝田-灞河组孔隙结构参数均值系数为 9.27, 表明孔喉分布较均匀。从进汞曲线(图 11)

表 1 蓝田-灞河组压汞曲线参数平均值

Table 1 Mean value of mercury intrusion curve parameters of Lantian-Bahe Formation											
样品号	砂岩类型	中值粒径/μm	层位	渗透率/mD	孔隙度/%	孔隙体积/cm ³	最大连通半径/μm	退汞效率/%	分选系数	歪度系数	均值系数
LT-2	粗砂岩	0.2957	蓝田-灞河组	4853	25.92	2.544	31.957	80.18	7.183	1.07	9.27
LT-5	粉砂岩	0.1624	蓝田-灞河组	393	27.84	3.504	12.672	76.13	3.724	1.14	5.01

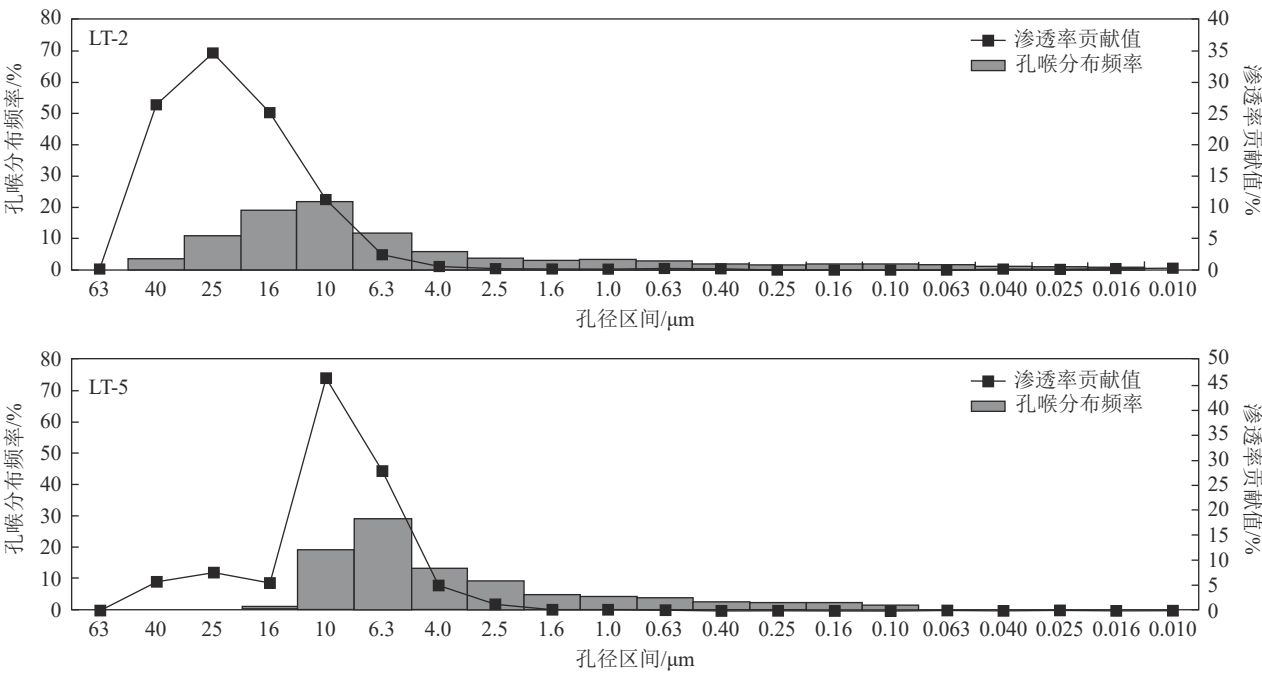


图 9 蓝田-灞河组砂岩孔喉分布图

Fig. 9 Pore throat distribution maps of Lantian-Bahe Formation

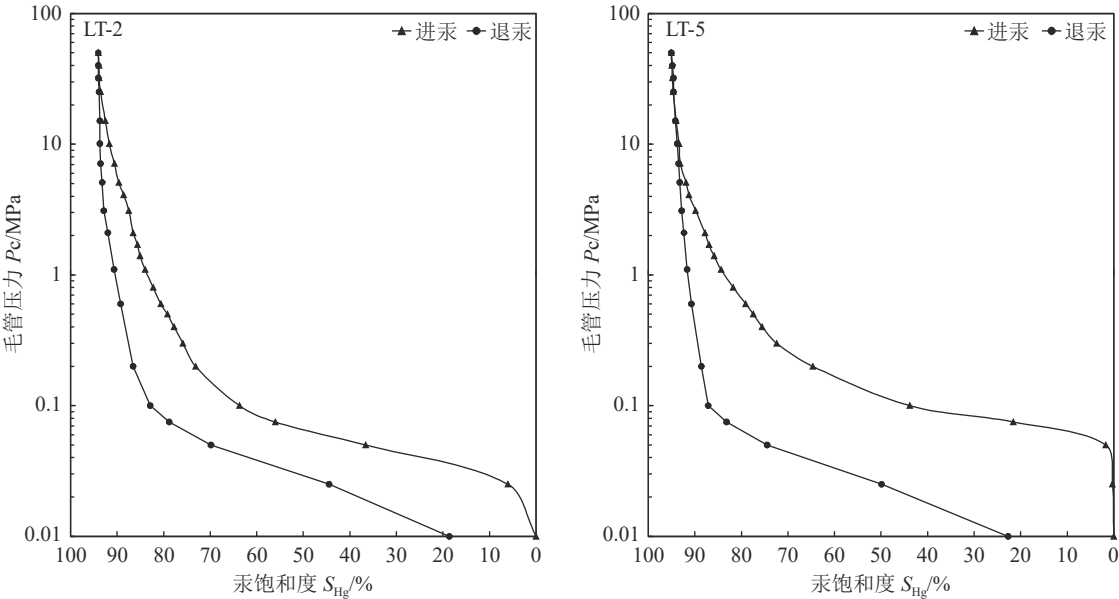


图 10 蓝田-灞河组压汞曲线图

Fig. 10 Mercury intrusion curves of Lantian-Bahe Formation

也可以看出,进汞曲线前期斜率较缓,平台性较好;进汞曲线后期斜率高,平台性较差,表明大孔喉分选好,小孔喉分选差。

4 富水性及渗流特征

据前人统计,开采段蓝田-灞河组且资料齐全的

地热井有 61 眼,集中于西安、咸阳地区(夏岩等, 2023),是关中盆地地热资源目前的主要开发利用层段。根据西安凹陷部分地热水井出水量统计(表 2),主要取用热储层为蓝田-灞河组和高陵群顶部,取水段砂岩厚度较大,最高可达 385.04 m,砂厚比也较大,出水量随砂厚的增大而增大,西安凹陷蓝田-灞

河组储层富水性较好,单位厚度砂岩单位涌水量可达 $0.0035\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 。

抽水试验所作流量-降深曲线的经验方程可以用来推求最大涌水量,常见的 3 种线型为抛物线型、指数曲线型和对数曲线型。根据流量-降深绘制 3 种曲线(图 12),通过误差拟合计算,确定涌水量方程为指数方程(图 12-b)。HX1 井最大涌水量在降深 184.45 m 时,其出水量可达 $201.05\text{ m}^3/\text{h}$ 。同理, HX2 井最大涌水量在降深 180.25 m 时,出水量可达 $216.3\text{ m}^3/\text{h}$; 051-JD 井最大涌水量在降深 112 m 时,出水量可达 $395.50\text{ m}^3/\text{h}$ 。

同一热储层段在断裂交会部位,地下热水的赋存和运移条件相对较好,富水性好。根据 Q - s (流量-降深)曲线(图 13-a)可知,随着降深的增加,流量逐渐增大。根据 q - s (单位涌水量-降深)曲线(图 13-b)可知, HX1 井和 HX2 井及其 R1 井变化趋势相当,表现大落程对应的降深单位涌水量较高, R1 井随着降深的加大,单位涌水量幅度明显下降,建议该井初期取水量应控制在 $50\sim 60\text{ m}^3/\text{h}$,使地层慢慢疏通,增加供水半径,以延长地热井使用寿命。

据前人试验研究,明确 300psi 的离心力最接近于致密气藏砂岩气藏成藏过程中的排驱压力(高树生等, 2009; 支鑫, 2015),因此,在 300psi 离心条件下的含水饱和度值可近似认为是关中盆地蓝田-灞河组储层的原始饱和度值。本次选取蓝田-灞河组 2 块砂岩样品,将样品用 300psi 离心力离心后,应用核磁共振测试分析水的赋存状态(庞振宇等, 2017; 周繁华等, 2017; 朱晴等, 2020; 任广磊, 2021), T_2 谱分布形态总体为左低右高的双峰结构(图 14)。选取蓝田-灞河组 LT-2、LT-5 样品,利用实验结果及 T_2 图谱分析评价。

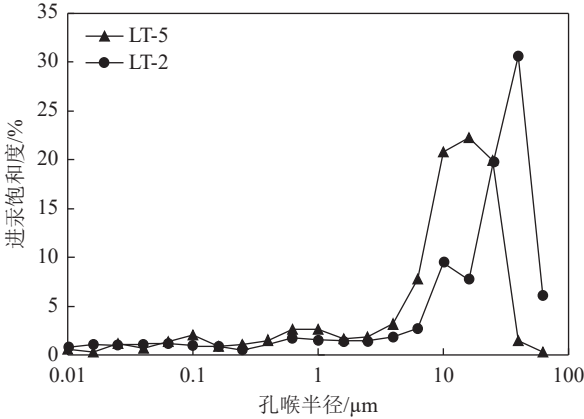


图 11 蓝田-灞河组砂岩孔喉半径分布

Fig. 11 Distribution of pore throat radius in Lantian-Bahe Formation sandstone

LT-2 样品的核磁共振 T_2 谱图(图 14)显示, T_2 截止值(T_2 cutoff)为 22.95 ms, T_2 谱形态为双峰型,可动流体饱和度为 66.43%,远高于束缚水饱和度,分布在 T_2 cutoff 右侧表示可动流体的右峰面积明显大于 T_2 cutoff 左侧束缚水面积,直观地反映了储集岩孔隙中可动流体多于束缚流体,这与蓝田-灞河组物性好、喉道类型密切相关,代表孔喉连通性好、渗流性好,可动流体饱和度大于 65%,划分为 I 类(好)储层。

LT-5 样品的核磁共振 T_2 图谱(图 14)显示, T_2 截止值(T_2 cutoff)为 13.05 ms, T_2 谱形态为双峰型,可动流体饱和度为 66.28%,远高于束缚水饱和度,分布在 T_2 cutoff 右侧表示可动流体的右峰面积明显大于 T_2 cutoff 左侧束缚水面积,直观地反映了储集岩孔隙中可动流体多于束缚流体,这与蓝田-灞河组物性好、喉道类型密切相关,代表孔喉连通性好、渗流性好,可动流体饱和度大于 65%,划分为 I 类(好)储层。

表 2 西安凹陷部分地热水井出水量

Table 2 Water yield of some geothermal water wells in Xi'an sag

井位	井深/m	开采段深度及厚度/m	取用热储层	取水段砂岩厚度/m	砂厚比/%	抽水降深/m	出水量/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	单位厚度砂岩单位涌水量/($\text{m}^3\cdot(\text{h}\cdot\text{m}^{-2})$)
WTY	2500	1004.8~2399.3(1394.5)	$\text{N}_2\text{I}+b$ 、 N_1gI 顶部	270	19.36	70	66.43	0.0035
SFDX	2727.39	1173.8~2677.4(1503.6)	$\text{N}_2\text{I}+b$ 、 N_1gI 顶部	305.96	15.76	55.19	95.9	0.005
ZFDX	3700.12	2243.0~3596.0(1353)	$\text{N}_2\text{I}+b$ 、 N_1gI 顶部	385.04	17.56	71.0	112.11	0.004
LLW	2602	1697.3~2567.0(869.7)	$\text{N}_2\text{I}+b$ 、 N_1gI 顶部	179.2	20.60	73.12	66.07	0.0050

注: $\text{N}_2\text{I}+b$ —新近系蓝田-灞河组; N_1gI —新近系高陵群

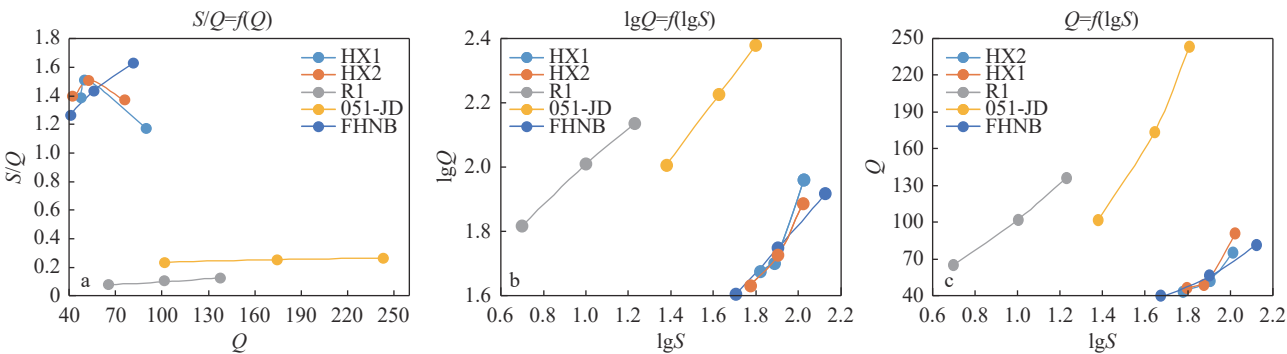


图 12 蓝田-灞河组流量-降深图

Fig. 12 Flow drawdown diagrams of Lantian-Bahe Formation

a—抛物线方程曲线图; b—指数方程曲线图; c—对数方程曲线图; Q —流量(m^3/h); S —降深(m)

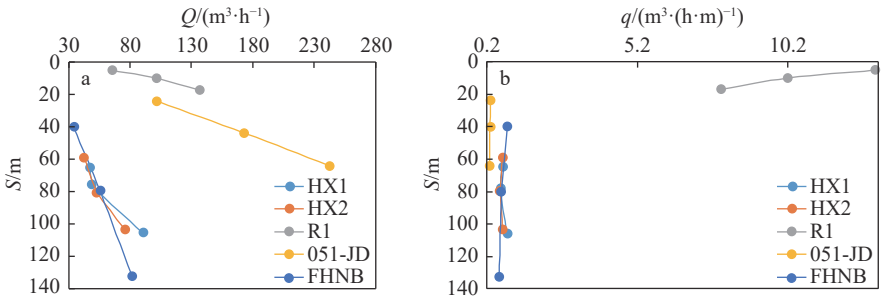


图 13 固市凹陷抽水试验曲线图

Fig. 13 Pumping test curves of Gushi Sag

a— Q - S 曲线; b— q - S 曲线; Q —流量; S —降深; q —单位涌水量

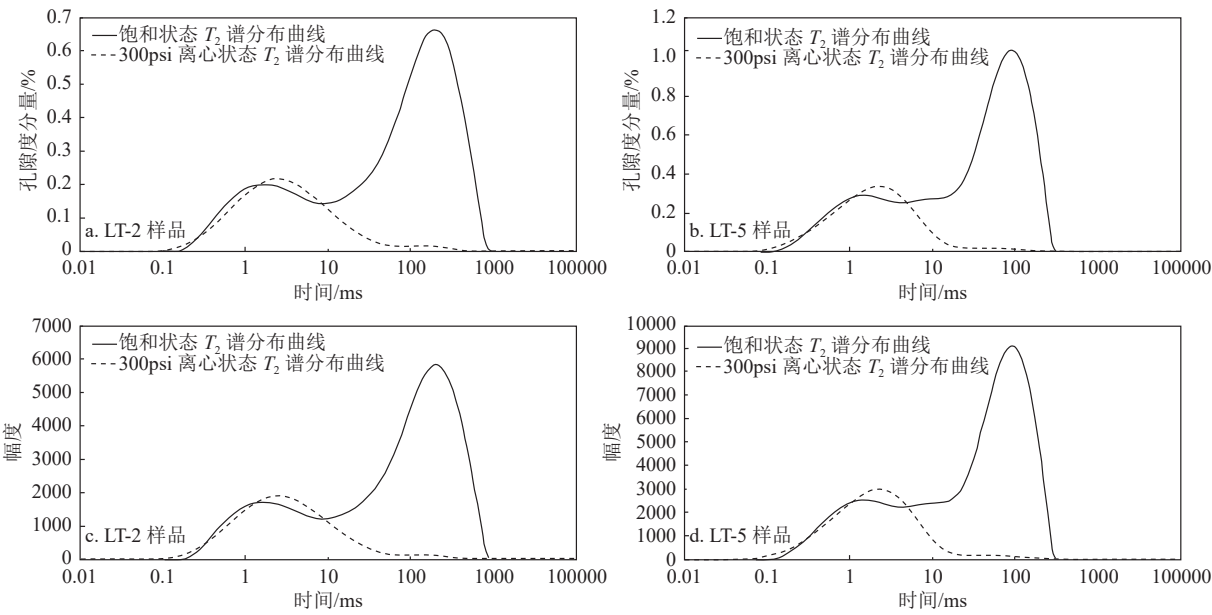


图 14 蓝田灞河组核磁共振 T_2 谱分布图

Fig. 14 T_2 NMR spectrum distribution maps of Lantian-Bahe Formation

a—LT-2 样品刻度为孔隙度的核磁共振 T_2 谱分布图; b—LT-5 样品刻度为孔隙度的核磁共振 T_2 谱分布图; c—LT-2 样品原始幅度的核磁共振 T_2 谱分布图; d—LT-5 样品原始幅度的核磁共振 T_2 谱分布图

5 储层评价

热储层物性优劣对地热回灌有很大影响,不同地区的地热回灌效果明显不同(闫文中等, 2014)。各热储层砂地比、孔隙度、渗透率较大的区域,其砂体连通性较好,有利于地热水回灌。蓝田灞河组热储层砂地比、孔隙度、渗透率等整体较高陵群和张家坡组热储层高。关中盆地新生界热物性资料较缺乏,勘探研究程度较低,目前还没有统一的储层评价标准。因此,本次仅根据有限的资料进行初步评价。按原石油天然气总公司行业标准(SY/T6285—1997)(中国石油天然气总公司, 1997)(表 3),并结合砂岩储集层孔隙结构特征和物性资料分析(陈娟萍, 2005; 刘君毅等, 2021),蓝田-灞河组孔隙度为 25%~30%,渗透率为 600~2000 mD,砂体厚度为 200~400 m,降深 30 m 时单井出水量处于 80~100 m³/h 之间,储层类型基本属于Ⅱ类储集层,综合评价为高孔隙度渗透层。

6 结 论

(1)关中盆地蓝田-灞河组岩性主要为褐色、灰色泥岩与浅灰色粗砂岩、细砂岩呈略等厚一不等厚互层,砂岩层段较厚,处于 150~600 m 之间,粗砂岩厚度大于细砂岩厚度,砂地比约为 0.3,上部张家坡组底部的泥岩可作为蓝田-灞河组热储层良好的盖层,起到保温作用,为蓝田-灞河组疏松的砂岩提供良好的储水储热功能。

(2)关中盆地新近系西安凹陷蓝田-灞河组砂岩孔隙度为 20%~25%,渗透率为 100~200 mD,固市凹陷孔隙度为 10%~20%,渗透率为 1~100 mD,通过不同构造单元蓝田-灞河组物性对比,西安凹陷蓝田-灞河组物性好于固市凹陷。在平面上蓝田-灞河组

孔渗表现为盆地边缘大,盆地中心小的分布特征。

(3)蓝田-灞河组砂岩孔隙以原生粒间孔、粒间残余孔隙为主,局部见少量微裂缝发育,见少量长石溶孔,成岩自生矿物由片状伊利石等粘土矿物组成,多呈孔隙充填产出,岩石孔隙发育好。孔隙体积为 2.5 cm³,排驱压力为 0.023 MPa,中值压力为 0.067 MPa,中值孔喉半径为 10.94 μm,渗透率贡献值高。

(4)蓝田-灞河组砂岩孔隙结构好,砂岩发育原生粒间孔和粒间残余孔。蓝田-灞河组孔隙结构参数均值系数为 9.27,孔喉分布较均匀。蓝田-灞河组出水量大,单位厚度砂岩单位涌水量高,富水性及渗流特征好。

(5)新近系中新统蓝田-灞河组砂岩储层类型属于Ⅱ类储集层,综合评价为高孔隙度渗透层,是最有利的地热开发层段。

参考文献

Artemieva I M, Mooney W D. 2001. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: Aglobalstudy[J]. Journal of Geophysical Research(Solid Earth), 106(B8): 16387~16414.

Tang Y C, Zhou S Y, Y. John Chen, et al. 2015. Crustal structures across the western Weihe Graben, North China: Implications for extrusion tectonics at the northeast margin of Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research(Solid Earth), 120(7): 5070~5081.

Pan W, Huang Z, Ning M, et al. 2014. Crustal structure beneath the Weihe Graben in central China: Evidence for the tectonic regime transformation in the Cenozoic[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 81: 105~114.

Qu W, Wang Y S, Xu C, et al. 2017. Tectonic stress field of the Weihe Basin using the finite element method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 42(12): 1749~1755.

Zhang L, Geng S H, Chao J H, et al. 2022. Scaling and blockage risk in geothermal reinjection wellbore: Experiment assessment and model prediction based on scaling deposition kinetics[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 209: 109867.

陈娟萍. 2005. 鄂尔多斯盆地东北部山西组储层控制因素分析[D]. 西

表 3 储层分类标准

Table 3 Reservoir classification standard

级别指标		I	II	III	IV	V	VI
物性	孔隙度/%	≥30	30~25	25~15	15~10	10~5	<5
	渗透率/mD	≥2000	2000~500	500~50	50~10	10~1	1~0.1
	砂体厚度/m	>400	200~400	150~200	100~150	50~100	<50
	降深30 m时单井出水量/(m ³ ·h ⁻¹)	>100	80~100	60~80	40~60	20~40	<20
	储层类型	特高孔渗	高孔渗	中孔渗	低孔渗	特低孔渗	超低孔渗
评价		最好	好	较好	较差	差	极差

- 北大学硕士学位论文.
- 程辉, 王付勇, 宰芸, 等. 2020. 基于高压压汞和核磁共振的致密砂岩渗透率预测[J]. 岩性油气藏, 32(03): 122–132.
- 褚庆国, 朱世保. 2019. 重庆地区岩层储能过程经济性研究[J]. 西部探矿工程, 31(6): 149–152, 157.
- 董敏, 王宗秀, 董会, 等. 2017. 关中盆地花岗岩石英脉流体包裹体与氦气成藏特征研究[J]. 西北地质, 50(3): 222–230.
- 高树生, 郭和坤, 熊伟, 等. 2009. 核磁共振技术测试低渗砂岩气藏可动水饱和度研究[C]//油气田开发技术大会. 中国石油学会.
- 谷天峰, 王家鼎, 王煜, 等. 2007. 咸阳城市地质环境综合评价研究[J]. 水土保持通报, (3): 69–74.
- 韩恒悦, 张逸, 袁志祥. 2002. 渭河断陷盆地地带的形成演化及断块运动[J]. 地震研究, (4): 362–368.
- 何满潮, 刘斌, 姚磊华, 等. 2004. 地热对井回灌渗流场理论研究[J]. 中国矿业大学学报, (3): 11–14.
- 洪增林, 张银龙, 周阳. 2019. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. 中国地质, 46(5): 1224–1235.
- 黄建军, 周阳, 滕宏泉, 等. 2021. 关中盆地西安凹陷地热水赋存特征及其资源量估算[J]. 西北地质, 54(1): 196–203.
- 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): 2892–2910.
- 孔星星, 肖佃师, 蒋恕, 等. 2020. 联合高压压汞和核磁共振分类评价致密砂岩储层——以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[J]. 天然气工业, 40(3): 38–47.
- 刘润川, 任战利, 任文波, 等. 2023. 渭河盆地西安凹陷地热水热储特征及开发方式[J]. 地质学报, 97(10): 3456–3474.
- 李荣西, 刘建朝, 魏刚峰, 等. 2009. 渭河盆地地热水水溶烃类天然气成因与来源研究[J]. 天然气地球科学, 20(5): 774–780.
- 李祥根, 冉勇康. 1983. 华山北坡及渭南塬前活断层[J]. 华北地震科学, (2): 10–18, 9.
- 李修成, 马致远, 张雪莲, 等. 2016. 陕西省关中盆地东大地热田成因机制分析[J]. 中国地质, 43(6): 2082–2091.
- 李智超, 李文厚, 李永项, 等. 2015. 渭河盆地新生代沉积相研究[J]. 古地理学报, 17(4): 529–540.
- 蒯文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312–321.
- 刘君毅, 王清辉, 冯进, 等. 2021. 基于岩石物理相的复杂砂岩储层分类评价——以珠江口盆地惠州凹陷为例[J]. 中国石油勘探, 26(2): 92–102.
- 刘林, 芮会超. 2018. 渭河盆地结构特征及演化研究[J]. 地质力学学报, 24(1): 60–69.
- 庞振宇, 李艳, 赵习森, 等. 2017. 特低渗储层可动流体饱和度研究——以甘谷驿油田长 6 储层为例[J]. 地球物理学进展, 32(2): 702–708.
- 彭建兵. 1992. 渭河断裂带的构造演化与地震活动[J]. 地震地质, (2): 113–120.
- 饶松, 姜光政, 高雅洁, 等. 2016. 渭河盆地岩石圈热结构与地热水热源机理[J]. 地球物理学报, 59(6): 2176–2190.
- 任广磊. 2021. 致密砂岩气藏气水两相渗流的核磁共振在线实验研究[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 35(3): 46–49.
- 任战利, 刘润川, 任文波, 等. 2020. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素[J]. 地质学报, 94(7): 1938–1949.
- 任战利, 张莹, 刘润川, 等. 2022. 不同地区典型未固结砂岩热储层特征及评价研究报告[R]. 国家重点研发计划项目.
- 任战利, 张莹, 兰华平, 等. 2023. 关中盆地地热资源调查及开发技术政策研究成果报告[R]. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院合作项目.
- 宋磊, 宁正福, 孙一丹, 等. 2017. 联合压汞法表征致密油储层孔隙结构[J]. 石油实验地质, 39(5): 700–705.
- 隋学文, 孙希满, 石凤蛟. 2011. 黑龙江省林甸县天星小区深层地热能供暖分析评价[C]//地温资源与地源热泵技术应用论文集(第四集): 86–90.
- 孙红丽. 2015. 关中盆地地热资源赋存特征及成因模式研究[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文.
- 唐瑞, 赵峰, 王佳武, 等. 2018. 地面综合物探在蓝田县地热水井位论证中的应用[J]. 陕西地质, 36(2): 73–77.
- 汪集旸, 胡圣标, 程本合, 等. 2001. 中国大陆科学钻探靶区深部温度预测[J]. 地球物理学报, (6): 774–782.
- 汪集旸, 汪维安. 1986. 辽河裂谷盆地地幔热流[J]. 地球物理学报, (5): 450–459.
- 王贵玲, 蒯文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 94(7): 1923–1937.
- 王全庆, 裴先治. 1990. 渭河裂谷盆地的构造特征分析[J]. 长安大学学报(地球科学版), (1): 40–49.
- 王伟, 宋渊娟, 黄静, 等. 2021. 利用高压压汞实验研究致密砂岩孔喉结构分形特征[J]. 地质科技通报, 40(4): 22–30+48.
- 王学鹏, 刘欢, 蒋书杰, 等. 2020. 沉积盆地砂岩热储回灌试验研究——以山东禹城市为例[J]. 地质论评, 66(2): 485–492.
- 卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 2010. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 37(6): 1733–1739.
- 夏岩, 张莹, 郭路, 等. 2023. 关中盆地蓝田-灞河组地热水化学特征及形成机制[J]. 非常规油气, 10(4): 1–11, 21.
- 闫文中, 穆根胥, 刘建强. 2014. 陕西渭河盆地关中城市群地热水回灌试验研究[J]. 上海国土资源, 35(2): 32–35.
- 张健, 董森, 王蓓羽, 等. 2021. 陕西关中盆地地热资源及壳幔温度结构的地球物理分析[J]. 地球科学与环境学报, 43(1): 150–163.
- 张雪. 2015. 渭河盆地天然气及氦气成藏条件与资源量预测[D]. 长安大学博士学位论文.
- 张莹, 任战利, 邢光远, 等. 2023. 渭河盆地新近系热储层特征[J]. 地质通报, 42(11): 1993–2005.
- 支鑫. 2015. 苏西致密砂岩气藏储层产水机理及预测[D]. 中国科学院研究生院(渗流流体力学研究所) 硕士学位论文.
- 中国石油天然气总公司. 1997. 油气储层评价方法(SY/T6285—1997) [S].
- 周繁华, 杨帆, 张宁, 等. 2017. 陇东地区延长组核磁共振录井解释评价方法研究[J]. 录井工程, 28(4): 52–55, 131–132.
- 周阳, 邓念东, 王凤, 等. 2017. 浅层地热能适宜性分区结构的分形原理[J]. 中国地质调查, 4(1): 18–23.
- 周阳, 李锋, 闫文中, 等. 2016. 关中盆地主要城市浅层地热能资源量赋存规律研究[J]. 中国地质调查, 3(4): 12–18.
- 周阳, 穆根胥, 张卉, 等. 2017. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J]. 中国地质, 44(5): 1017–1026.
- 朱晴, 乔向阳, 张磊. 2020. 高压压汞在致密气藏孔喉分布表征和早期产能评价中的应用[J]. 岩矿测试, 39(3): 373–383.