

DOI: 10.12401/j.nwg.2023068

鄂尔多斯盆地延长油气区地热资源 赋存特征及开发利用建议

白奋飞¹, 魏登峰¹, 韩伟^{2,*}, 王菲菲¹

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710065; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心,
陕西 西安 710119)

摘要: 鄂尔多斯盆地蕴含丰富的中低温地热能源, 通过对其中延长油气区地热资源赋存状态研究, 发现区内主要有西部白垩系碎屑岩和东部石炭系—侏罗系碎屑岩两套热储层; 岩石热导率与地层岩石的成岩程度、孔隙度等关系密切; 地温梯度为 2.73~3.50 °C/100 m, 整体显示北高南低, 与地层埋深呈正相关; 大地热流值为 57.28~86.18 mW/m², 具有明显的东西向展布特征。综合分析认为: 区内地热资源东部优于西部, 可具体划分浅层低温有利区、中层中低温有利区和中深层中温有利区等 3 类地热资源有利区。结合油田地热资源开发利用实例, 认为对这些有利区内的废弃井加以改造利用, 可降低地热开发工程成本, 在地热发电、工业利用及三产养殖等方面实现地热资源梯级利用, 有望建立“源网荷储一体化”的能源互联网构架。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 延长油气区; 地热; 废弃井利用; 清洁能源

中图分类号: P962

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0329-11

Occurrence Characteristics and Exploitation of Geothermal Resources in Yanchang Oil and Gas Area of Ordos Basin

BAI Fenfei¹, WEI Dengfeng¹, HAN Wei^{2,*}, WANG Feifei¹

(1. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey,
Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: Ordos Basin is rich in geothermal energy at moderate and low temperature. By studying the occurrence state of geothermal resources in Yanchang oil and gas area, it is found that there are mainly two sets of thermal reservoirs: Cretaceous clastic rocks in the west and Carboniferous and Jurassic clastic rocks in the east; The thermal conductivity of rock is closely related to the degree of diagenesis and porosity of formation rock; The geothermal gradient is 2.73–3.50 °C/100 m, which is higher in the north and lower in the south; The earth heat flow value is 57.28–86.18 mW/m², with obvious east–west distribution characteristics. The comprehensive analysis shows that the geothermal resources in the eastern part of the region are better than those in the western part, and can be divided into three types: shallow low temperature favorable area, middle–low temperature fa-

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-04-18; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省重点研发项目“延长油气区大地热流调查与地温场分布研究”(2018GY-090), 国家自然科学基金重点项目

“鄂尔多斯、沁水沉积盆地中生代晚期古地温场对岩石圈动力学演化及油气赋存的约束作用”(41630312)资助。

作者简介: 白奋飞(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事油气及地热资源发展战略研究工作。E-mail: baifenfei@163.com。

* 通讯作者: 韩伟(1981-), 男, 教授级高工, 主要从事油气资源调查评价工作。E-mail: hw_198196@163.com。

favorable area and middle-deep medium temperature favorable area. Combined with the exploitation and utilization examples of geothermal resources in oil fields, it is considered that the transformation and utilization of abandoned Wells in these favorable areas can reduce the cost of geothermal development projects and realize the stepwise utilization of geothermal resources in geothermal power generation, industrial utilization and three-production and aquaculture, it is expected to establish an energy internet framework of "Source network load storage integration".

Keywords: Ordos basin; Yanchang oil and gas area; geothermal heat; utilization of abandoned wells; clean energy

在全球提倡碳中和的背景下,对传统化石能源的使用和依赖将逐步减少已成为趋势,地热能、太阳能和风能等清洁能源对化石能源的替代进程在不断地加快,其中,地热能由于分布广泛、储量丰富、稳定性好等特点,是清洁能源中的排头兵(王贵玲等, 2017; Cheng et al., 2019; 杨学明等, 2020; 赵银鑫等, 2023)。然而,复杂而昂贵的钻探工程在地热能开发利用过程中造成了较大的成本压力,其发展进程受到了一定的制约。

中国油气田所在盆地往往蕴含有丰富的地热资源,这些油田在勘探开发过程中已实施了大量的钻井,随着工作的不断开展,各油田含水率不断升高,开采价值降低甚至废弃的钻井不在少数。这些花费巨大财力物力实施的钻井在即将完成其油气勘探开发工作使命的同时,是否能以其为基础开展地热资源开发利用,值得油田企业探索。近年来,位于渤海湾盆地的华北油田、辽河油田以及松辽盆地的大庆油田等油气区已经积极地开展了改造废弃钻井为地热井的项目,通过对废弃井井身结构进行改造,实现了多个废井、老井二次利用的成功案例,将地热资源利用于地热发电、集输伴热、生活供暖及种植养殖等领域,为油田废井改造提供了良好的借鉴(魏伟等, 2012; 徐怀颖等, 2012; Wang et al., 2016; 汪集旻等, 2017; 吕毫龙等, 2018; 宋超凡等, 2021)。

鄂尔多斯盆地作为中国重要的能源基地,孕育了丰富的石油、天然气、煤炭以及地热等自然资源(尹立河等, 2008; 王贵玲等, 2017; 任战利等, 2017)。据统计,盆地内仅延长油气矿权区内目前约有报废井 3 000 余口,随着时间推移,这些报废井还在不断地增加,但是关于这些废井、老井的再次利用鲜有提及。笔者将以延长油气区内地热资源赋存特征研究为基础,通过 12 件典型热储层的岩石样品热导率测试结果, 54 口井的地温梯度和大地热流值, 4 口井共计 25 个测点的

静压—静温测温数据,进一步分析区内开展地热资源综合利用的潜力及可行性,为油田实现资源清洁、绿色、高效利用提供理论支撑。

1 区域地质背景及热储层概况

鄂尔多斯盆地是发育以中低温($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$)地热资源为主的稳定克拉通盆地(刘润川等, 2021),主体以前寒武系结晶变质岩为基底,其上依次沉积了下古生界碳酸盐岩、上古生界—中生界碎屑岩及中、新生界沉积地层(韩勇等, 2022; 苏中堂等, 2022)。该盆地蕴含着丰富的热传导型地热资源,具有储集条件较好、储层较多、厚度较大、分布范围广的特点,总体上盆地地热资源开发潜力较大,前人研究表明其地热资源量约为 $5.35\times 10^{15}\sim 1.48\times 10^{18}\text{ kJ}$,折合标准煤 $182.70\times 10^8\sim 503.00\times 10^8\text{ t}$ (尹立河等, 2008; 王贵玲等, 2017; 刘润川等, 2021)。盆地内的热储层主要包括白垩系碎屑岩、石炭系—侏罗系碎屑岩、寒武系—奥陶系碳酸盐岩和周围断陷盆地的新生界松散层等(尹立河等, 2008; 蔺文静等, 2013; 王贵玲等, 2017; 任战利等, 2017),整体富水性弱、水质差(侯光才等, 2007)。

延长油气区位于鄂尔多斯盆地东南部的陕北斜坡(图 1a),区内构造平缓,是中国典型的低渗透油田,石油主要开发层系为侏罗系延安组的延 4+5—延 10 油层组和三叠系延长组的长 1—长 10 油层组,天然气主要开发层系为上古生界及下古生界奥陶系等,油气储层主要包括石炭系—侏罗系碎屑岩、寒武系—奥陶系碳酸盐岩等。同时,该区主要分布有两套热储层,分别为沿横山—安塞—宜君一线以西的白垩系碎屑岩和以东的石炭系—侏罗系碎屑岩(图 1b),油气储层是地热储层的一部分,整体具有物性差、非均质性强,地层能量低等特点(张刚等, 2020; 王香增等, 2022)。

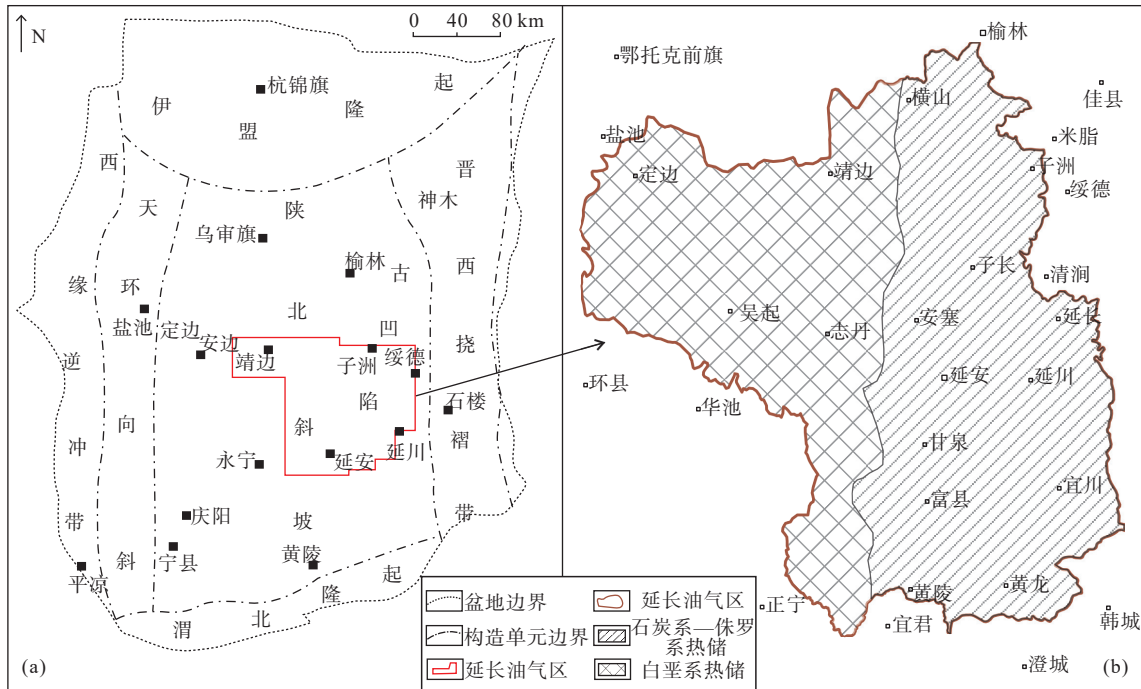


图 1 延长油气区位置(a)与热储分布(b)图

Fig. 1 (a) Location and (b) heat storage distribution of the Yanchang oil and gas area

2 延长油气区地热资源赋存特征

大地热流值是地球内部的热能通过岩层传导和地热流体对流作用在单位时间内通过地球表面单位面积的热流表征,是反映地热资源最直观的数据之一,与岩石热导率、地温梯度等有直接联系。

2.1 岩石热导率

岩石热导率主要由矿物组合与结构、胶结程度、孔隙度及含流体状况决定,代表了物质传递分子运动热能的能力,是计算大地热流值必要的的数据之一。其计算公式如下:

$$K = QD/[F(T_2 - T_1)t]$$

式中: Q 为厚度 D 的岩样两壁温差为 $T_2 - T_1$ 时, t 时间内通过截面积 F 的热量。

本次研究在盆地 40 口测温探井资料的基础上,选取延长油气区内钻井较多的延安市延长、志丹、甘泉等 6 个区县 9 口探井共计 12 块各地层典型样品进行了热导率测试(表 1)。样品自下而上涵盖了古生界马家沟组、上古生界山西组、中生界三叠系延长组等各主要油气生产层位,同时也是主要的热储层,岩性包括砂岩、泥岩、白云岩及灰岩。测试工作在西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室进行,采用热常数分析仪(TCI)分别对取得的 12 组岩心分

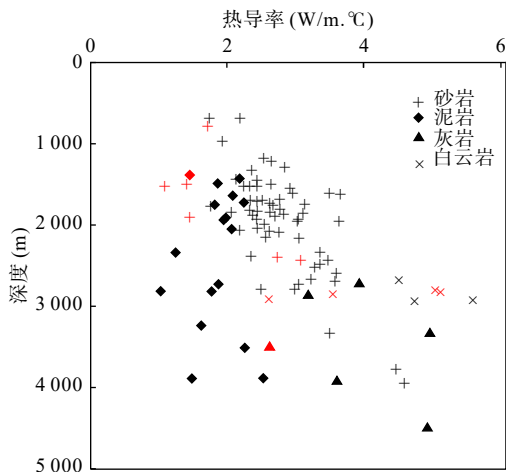
别进行了风干岩样热导率、岩心饱和水热导率测试。

朱传庆等(2022)通过瞬态平板热源法对典型岩石的热导率开展研究,认为火山岩、碎屑岩和侵入岩以及碳酸盐岩的平均热导率依次升高;石英和白云石等为高热导率矿物,其含量直接影响岩石的热导率;碎屑岩的热导率随着孔隙度的增加而减小。本次测试 12 件样品的干样热导率与饱和水热导率有一定差异,但不同地区不同岩性的差异趋势基本一致:黄陵、安塞、志丹古生界碳酸盐岩的干样热导率最高,为 2.63~5.21 W/mk,延长地区上古生界山西组碎屑岩次之,为 2.84~3.05 W/mk,富县、甘泉地区中生界延长组碎屑岩最低,为 1.12~1.75 W/mk。碎屑岩的饱和水热导率均大于干样热导率,碳酸盐岩的饱和水热导率与干样热导率并无明显规律,说明岩石成分是影响热导率的最重要因素,地下水也是重要的热传导载体,对孔隙条件好的岩层影响尤为明显;在垂向上,岩石热导率大致随地层由老到新降低,虽然与深度并没有绝对的正相关关系,但是延长地区埋深较深的山西组砂岩干样热导率明显高于甘泉、富县地区埋藏较浅的延长组砂岩。甘泉地区的细砂岩热导率高于富县地区的砂岩可能是受砂岩粒度和石英含量不同所导致。结合任战利等(2007)对陕北斜坡不同岩性热导率随深度变化的特征,显示白云岩、灰岩的热导率 > 砂岩 > 泥岩(图 2)。

表1 延长油气区岩石热导率测试分析表

Tab. 1 Test and analysis table of rock thermal conductivity in Yanchang oil and gas area

序号	地区	井号	取样层位	岩性	深度(m)	干样热导率(W/mk)	饱和水热导率(W/mk)
1	甘泉	C114	中生界延长组	细砂岩	702.88	1.75	2.31
2		FX123	中生界延长组	泥岩	1408.50	1.45	1.59
3	富县	FX329	中生界延长组	砂岩	1423.88	1.44	1.58
4		L227	中生界延长组	砂岩	1430.88	1.12	1.62
5		L157	中生界延长组	砂岩	1792.50	1.47	1.82
6	延长	C88	上古生界山西组	砂岩	2295.50	2.84	3.56
7			上古生界山西组	细砂岩	2298.50	3.05	3.46
8	黄陵	Y883	下古生界本溪组	灰岩	3488.03	2.66	2.46
9			下古生界马家沟组	白云岩	2730.79	5.03	4.58
10	安塞	Y708	下古生界马家沟组	白云岩	2735.56	5.21	4.92
11			下古生界马家沟组	白云岩	2737.69	3.55	4.73
12	志丹	YT706	下古生界马家沟组	白云岩	2843.50	2.63	2.47



注: 红色为本次研究数据, 黑色引自任战利等

图2 研究区不同岩性热导率与深度对应关系
(据任战利等, 2007)

Fig. 2 Corresponding relationship between thermal conductivity and depth of different lithologies in the study area

因此, 笔者认为岩石热导率受其埋深以及矿物组成、结构和化学成分等影响十分显著, 岩石埋深越深, 成岩程度越高、孔隙度越小则其热导率越高, 这一观点与前人的研究成果一致(任战利等, 2007; 陈驰等, 2020; 朱传庆等, 2022)。

2.2 地温梯度

本次研究统计了延长油气区内各产油区长期积累的钻井温度及地温梯度数据(表2), 结果表明不同地区的地温梯度也不尽相同:

北部定边油田樊学区侏罗系延安组平均地温为

59.00 °C, 平均地温梯度为 2.77~3.10 °C/100 m, 三叠系延长组长 2-长 8 平均地温为 63.00~83.00 °C, 平均地温梯度为 3.00~3.10 °C/100 m; 靖边油田青阳岔区三叠系延长组长 2 平均地温为 32.70 °C, 平均地温梯度为 3.00 °C/100 m, 总体地温梯度为 2.77~3.10 °C/100 m。

中部吴起油田王沟门油区三叠系延长组长 4-长 8 平均地温为 65.00~67.00 °C, 平均地温梯度约为 2.73 °C/100 m; 志丹永宁油田延长组长 6 平均地温为 54.88~56.91 °C, 平均地温梯度为 2.76~2.78 °C/100 m; 安塞杏子川油田三叠系延长组为 2.91~3.18 °C/100 m; 延安甘谷驿油田长 6 油层组地温梯度平均为 3.09 °C/100 m, 延安南泥湾油田长 6 油层组地温梯度平均为 3.12 °C/100 m, 总体地温梯度为 2.73~3.12 °C/100 m。

南部甘泉下寺湾油田张岔区三叠系延长组长 2-长 6 地温梯度为 2.81~2.92 °C/100 m; 富县直罗油田大东沟区三叠系延长组长 8 平均地温为 53.12 °C, 平均地温梯度为 3.00 °C/100 m, 总体地温梯度为 2.81~3.00 °C/100 m。

此外, 本次研究分别对延长油气区内延安和靖边等地的 4 口采油井实施了静温测试(表 3)。测试层段主要为中生界延长组长 2-长 6 层段, 测试深度为 391~841 m, 测量间隔为 20~50 m, 每个测点驻停时长 10 min, 测得地温梯度为 2.85~3.50 °C/100 m。

对延长油气区 160 余口钻井的地层点测温数据、4 口井连续地层测温数据进行分析, 可以看出研究区地层连续测温与点测温数据一致性好, 可以客观地反

表2 延长油气区地温梯度、大地热流值估算表(1HFU=41.86 mW/m²)

Tab. 2 Estimated value of geothermal gradient and terrestrial heat flow in Yanchang oil and gas area

地区	油田	井数 (口)	深度(m)	层位	组段	地温梯度 (°C/100 m)	研究段热导率 K̄ (TCU)	热流量 q(HFU)	热流量 q(mW/m ²)
北部	靖边	4	1 550.00~2 000.00	J ₁	延安组	2.77~2.80	4.94~5.23	1.37~1.46	57.28~61.08
		3	1 668.00~2 166.00	T ₃	长2	2.74~2.79	5.23	1.43~1.46	60.01~61.10
		1	1 942.00~2 444.00	T ₃	长4+5	2.8	5.23	1.47	61.32
	安塞	7	700.00~1 100.00	T ₃	长2	3.00~3.22	4.92~5.27	1.57~1.62	65.70~67.73
		1	942.00	T ₃	长2	2.97	5.23	1.55	65.05
		2	1 120.00~1 300.00	T ₃	长6	2.92	5.27~5.48	1.54~1.60	64.42~67.00
中部	延安	1	3 012.00~3 480.00	P ₁	本溪组	2.51	6.32	1.59	66.41
		1	平均757.00	T ₃	长4+5+6	3.03	5.23	1.59	66.36
		8	407.00~725.00	T ₃	长6	2.93~3.33	4.87~5.46	1.60~1.63	67.02~68.39
	吴起	1	1 294.00~1 335.00	J ₁	延安组	2.72~2.78	5.41	1.47~1.50	61.60~62.96
		1	1 900.00	T ₃	长4+5 ²	2.79	5.46	1.52	63.81
		2	1 897.00~1 982.00	T ₃	长6	2.73~2.78	5.23~5.48	1.45~1.50	60.86~62.64
南部	志丹	1	1 980.00	T ₃	长8	2.91	4.94	1.44	60.18
		3	1 564.00~1 689.00	T ₃	长6	2.77~3.00	4.94~5.27	1.46~1.48	61.11~62.04
		1	1 830.00~2 090.00	T ₃	长8-10	2.88	5.23	1.51	63.08
	子长	1	2 295.00~2 298.00	P ₁	山西组	3.11	5.23	1.63	68.10
		1	890.00~920.00	T ₃	长6	2.91	5.48	1.60	66.77
		5	平均510.00	T ₃	长2	3.08~3.20	4.94~5.18	1.54~1.59	64.52~66.72
南部	甘泉	2	679.00~857.00	T ₃	长6	2.89~2.92	5.48	1.59~1.60	66.31~67.00
		2	681.00~804.00	T ₃	长8	2.73~2.77	5.99	1.64~1.66	68.50~69.50
		1	895.00	T ₃	长2	2.98	5.23	1.56	65.27
	富县	1	1 394.00	T ₃	长7	2.93	5.23	1.53	64.17
		3	1 250.00~1 458.00	T ₃	长8	2.85~3.08	4.94~5.46	1.52~1.57	63.69~65.70
		1	2 731.00~2 737.00	O ₁	马家沟组	2.66	7.74	2.06	86.18

映研究区地温特征。任战利等(2007)对鄂尔多斯盆地211口钻井的地层温度与深度开展研究,得出鄂尔多斯盆地平均地温梯度为2.93 °C/100 m,本次研究地层温度与深度之间的关系与其研究成果十分吻合(图3)。

综上所述,可知延长油气区地温梯度范围为2.73~3.50 °C/100 m,主要集中在3.00 °C/100 m左右。在平面上,整体由北高南低的趋势,北部靖边-横山北部及佳县-米脂地区为地温梯度高值区,南部黄陵探区属低值区(图4)。

2.3 大地热流值

大地热流是表征由地球内部向地表传输并在单位面积上散发的热量,是地球内部的各种动力学过程

的能量平衡在地表最直接的反映,数值上等于地温梯度与地层热导率之积:

$$q = -K \frac{dT}{dZ}$$

式中: q 为大地热流值(mW/m²); K 为岩石热导率(W/(m·K)); dT/dZ 为地温梯度(°C/km); “-”表示热流方向与地温梯度方向相反(饶松等,2013)。

通过计算,笔者最终获得了基本覆盖整个延长油气区的55个热流计算数据(表2)。结果表明,在垂向上,延长油气区内侏罗系大地热流值为57.28~62.96 mW/m²,平均为60.60 mW/m²;三叠系大地热流值为60.01~69.50 mW/m²,平均为65.24 mW/m²;古生界大地热流值为66.41~86.18 mW/m²,平均为73.57 mW/m²;地层越老,大地热流值越高。

表3 延长油气开发区钻井静压-静温梯度综合数据表

Tab. 3 Comprehensive data of drilling static pressure-static temperature gradient in Yanchang oil and gas development region

井区	井号	测点	测点深度 (m)	测点压力 (MPa)	压力差 (MPa)	压力梯度 (MPa/100 m)	测点温度 (°C)	温度差 (°C)	温度梯度 (°C/100 m)
延安	1号井	1	524.55	0.80	-	-	23.48	-	-
		2	574.50	0.97	0.17	0.85	24.17	0.69	3.45
		3	624.50	1.13	0.16	0.82	24.85	0.68	3.40
		4	674.50	1.30	0.17	0.83	25.46	0.61	3.05
		5	724.50	1.45	0.16	0.78	26.15	0.69	3.45
	2号井	1	644.00	0.23	-	-	30.84	-	-
		2	664.00	0.41	0.18	0.90	31.51	0.67	3.35
		3	684.00	0.59	0.19	0.93	32.18	0.67	3.35
		4	704.00	0.76	0.17	0.84	32.84	0.66	3.30
		5	724.00	0.94	0.18	0.89	33.47	0.63	3.15
	3号井	1	598.00	0.00	-	-	27.52	-	-
		2	618.00	0.10	0.10	-	28.13	0.61	3.05
		3	638.00	0.27	0.17	0.83	28.73	0.60	3.00
		4	658.00	0.44	0.17	0.87	29.30	0.57	2.85
		5	678.00	0.63	0.19	0.96	29.91	0.61	3.05
靖边	4号井	1	391.00	0.90	-	-	18.73	-	-
		2	441.00	1.35	0.46	0.91	20.48	1.75	3.50
		3	491.00	1.85	0.50	1.00	22.03	1.55	3.10
		4	541.00	2.35	0.50	1.00	23.62	1.59	3.18
		5	591.00	2.86	0.50	1.01	25.22	1.60	3.20
		6	641.00	3.35	0.50	0.99	26.87	1.65	3.30
		7	691.00	3.85	0.50	1.00	28.45	1.58	3.16
		8	741.00	4.35	0.50	1.00	30.08	1.63	3.26
		9	791.00	4.86	0.51	1.02	31.64	1.56	3.12
		10	841.00	5.36	0.50	1.00	33.20	1.56	3.12

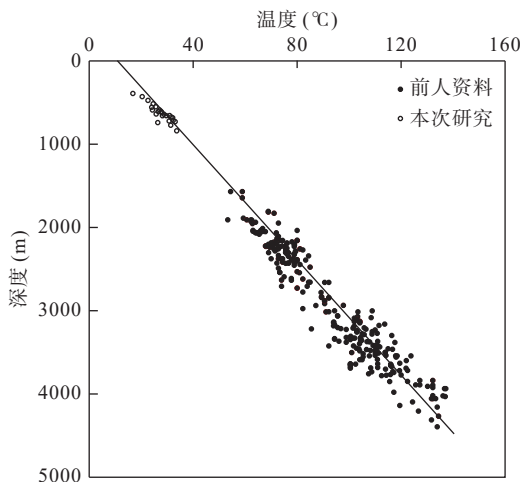


图3 延长油气区地层温度与深度关系
(据任战利等, 2007)

Fig. 3 Relation between formation temperature and depth in Yanchang oil and gas area

尹立河等(2008)研究认为,鄂尔多斯盆地地热资源主要受构造、地层及岩性控制,呈现周边高、中间低的特点。延长油气区东部靠近盆地东缘,西部靠近盆地中部,区内大地热流值等值线近SN向分布,总体呈东高西低的变化趋势(图4),与前人研究成果相一致。

综上所述,延长油气区内地层岩性的成岩程度越高、孔隙度越小,则岩石热导率越高,地层埋深与岩石热导率并无直接的正相关关系;地层温度与地层埋深存在明显的正相关性;大地热流值与热储层分布具有明显的东西向展布特征,成岩程度与岩石热导率的正相关性,也为大地热流值受地层、岩性的控制提供了证据。上述研究成果基本表明延长油气区内地热资源东部优于西部。

2.4 地热有利区

根据不同深度、不同层位温度分布及热储层分布

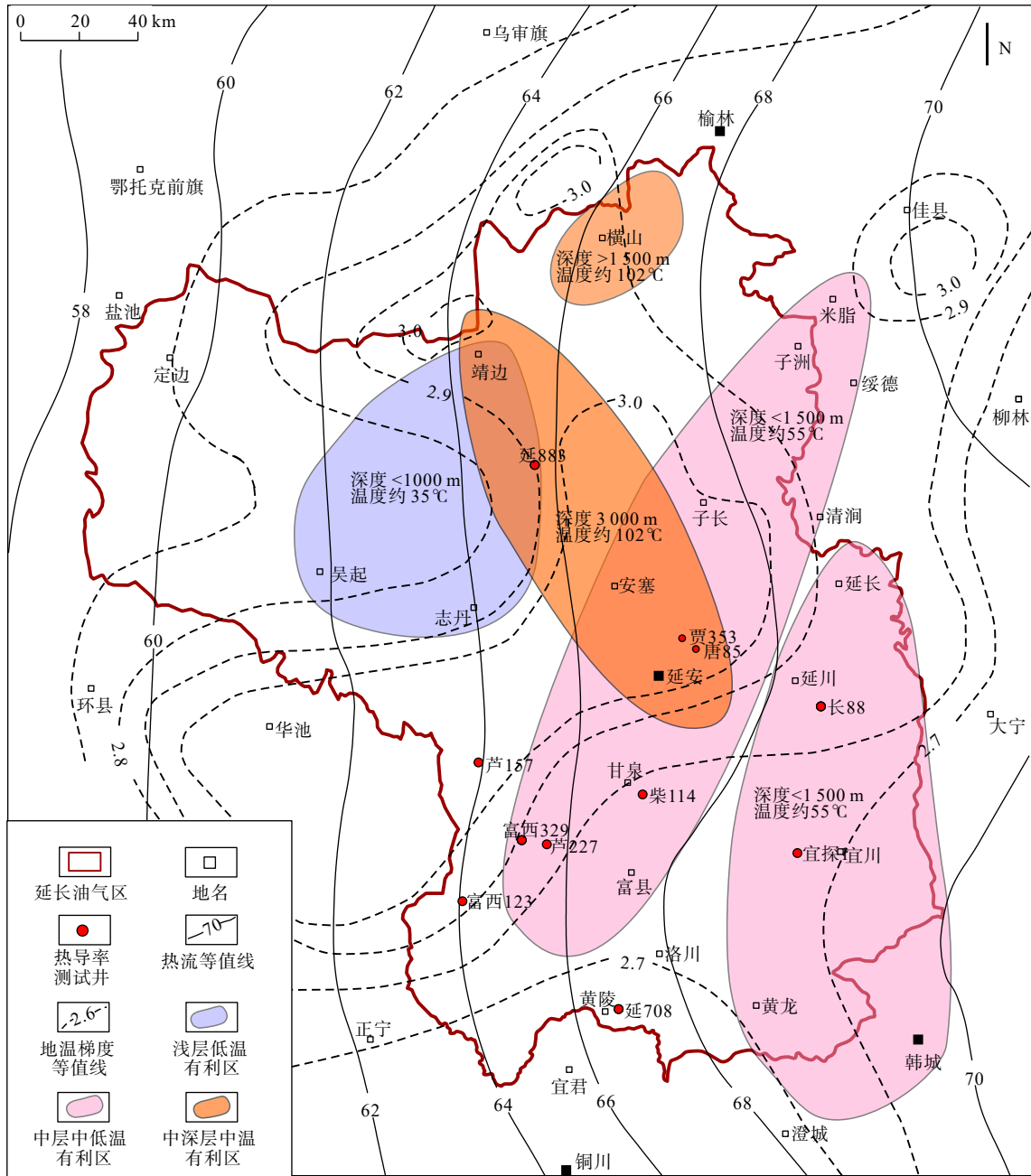


图 4 延长油气区地温梯度、大地热流和地热有利区分布

Fig. 4 Geothermal gradient, terrestrial heat flow and distribution of geothermal favorable areas in Yan'chang oil and gas area

规律, 对不同层位地热资源有利区进行了预测。延安组埋深为 300~1600 m, 平均深度为 800 m, 地温为 20~46 °C, 平均为 35.00 °C, 地热富集区集中在吴起-志丹-靖边地区。延长组埋深为 300~1300 m, 平均深度为 800 m, 地温为 20~80 °C, 平均为 55.70 °C, 地热富集区主要分布于神木-榆林-靖边一带、米脂-子长-延安一带及延川-宜川-黄龙一带地区。下石盒子组埋深为 1500~4400 m, 平均深度为 2800 m, 地温为 65~135 °C, 平均为 103.10 °C, 地热富集区神木-榆林-

横山一带, 砂岩储层厚度大。石炭系-二叠系砂岩储层在神木-榆林-横山一带厚度大, 最厚可达 650 m, 在南部区厚度较薄, 为 100~200 m。奥陶系碳酸盐岩风化壳埋深为 2800~4400 m, 平均深度为 3500 m, 地温为 50~140 °C, 平均为 100.00 °C, 地热富集区主要分布于斜坡区的延安-靖边一带。

综合考虑地温分布、地热储层厚度, 埋藏深度等因素, 本次研究将延长油气区内地热资源分为 3 类: 第一类为靖边-吴起-志丹一带的浅层低温有利区, 主

要集中在吴起-志丹-靖边地区,以1000 m以浅的延安组和延长组热储层为主,温度约为35.00℃;第二类为中层中低温有利区,主要集中在子洲-延安-富县和延长-黄龙一带,以埋深1000~1500 m之间的延长组热储层为主,温度约为55.00℃;第三类为中深层中高温有利区,主要分布在横山周边和靖边-延安一带,以埋深1500~4400 m的石炭系—二叠系砂岩和奥陶系碳酸盐岩风化壳热储层为主,温度约为100.00℃。

3 延长油田废井改造及地热资源利用建议

目前,针对地热资源的开发利用主要分为浅层地热、中深层地热及干热岩地热等3类。油田地热资源开发利用根据其自身资源类型以水热型地热能为主,用途主要集中在发电、工业利用及供暖三产等方面,并根据利用方式对地温需求由高到低实现梯级利用(闫家泓等,2007;韦雅珍等,2009;魏伟等,2012;徐怀颖等,2012;李克文等,2012;刘均荣等,2013;朱家玲等,2013;董秋生等,2016;Wang et al., 2016;汪集旻等,2017;吕毫龙等,2018;姚金剑,2020;宋超凡等,2021;李霄等,2021;张茂省等,2023)。

3.1 油田废井改造及地热资源利用现状

3.1.1 地热发电

地热发电是一种持续稳定的发电方式,由于所转化电能利用最广,始终是地热开发利用中最受重视的方向之一,对地温要求较高。中国油气区大多数均属于中低温地热资源区,地热资源大规模直接用于地热发电技术难度较大。目前,中低温地热发电技术也在逐步走向成熟,比如美国怀俄明州北部 Teapot Dome 油田就建成了利用油田产出水(平均温度90.60~98.90℃)的热能发电站,该机组于2008年9月投入使用,除因故障维修以外,目前一直连续稳定运行;美国阿拉斯加的 Chena 电站于2006年7月开始并网发电,其地热流体的温度仅为74℃,是目前国际上地热资源温度最低的商业发电站之一。中国华北油田也建成了留北中低温地热发电站,其井口水温117℃,装机容量为410 kw,自2011年4月投产,至2013年底累计运行2880 h,发电量为 21×10^4 kWh,增产原油量为 4.40×10^4 t(李克文等,2012)。

近年来,国内对于中低温地热发电的研究进展较为迅速(闫家泓等,2007)。李克文等(2012)认为当地热资源在90℃以上时,地热发电即具有经济性,其团

队还设计开发了一套利用地热与太阳能耦合发电的装置,具有很好的应用前景。

通过油田废弃钻井利用油田伴生的中低温地热资源发电不仅可大大降低钻井成本,还可将所发电用于油田井场照明、抽油、集输伴热、加热注入水等用电环节,实现资源重复、原位利用,达到节约成本、节能减排的效果。

3.1.2 地热水驱油

注水开发是油田提高采收率的常用方法之一,油田通常以注入天然水为主,这种方法在驱替原油的同时往往会造成油层温度下降、原油黏度增加等冷伤害(李锋等,2021)。因此,很多油田尝试利用地热水驱油。杨文等(2012)在安塞油田开展热水驱油试验后发现,井组日产液和日产油上升,递减率由5.45%下降至-9.60%。对应油井平均单井日增油量为0.80 t,累计增油量为239.30 t,对应7口油井中有6口见效,且在试验期内持续见效。李锋等(2021)在珠江口盆地 EP 油田 HJ 油藏开展地热水驱实验表明驱油效果提高了14.72%,数值模拟预测在约20年后地热水驱比天然水驱提高采收率13.09%。王学忠等(2009)、刘均荣等(2013)针对胜利油田地热采油的可行性进行了论证和设计,认为对井筒和地层进行改造,即可结合中低温地热发电实现油田增产和地热发电双赢。

因此,在控制热水注入流向的同时,可利用油田产出水的水化学性质与地层水接近的特点开展原油驱替。一方面解决了油田产出水排放造成的环境污染问题,另一方面由于油田产出水温度较高,可以避免低温度注入水对地层造成的冷伤害,从而保证地层的温度、波及系数稳定或升高,并可降低原油的黏度,起到良好的驱油效果。

3.1.3 其他方面

此外,中国较早开展油田地热资源利用的大庆油田、辽河油田、华北油田和大港油田对各自区内废弃井通过开天窗侧钻法、直接射孔法和改造泵室射孔法等改造方法,以地源热泵、水源热泵等方式将地热资源利用于供暖及地热养殖等领域,均取得了很好的效果,也为其他油田的地热利用积累了宝贵的经验(唐永香等,2019)。

3.2 延长油田地热资源利用建议

延长油气区地热资源主要为浅层低温、中层中低温和中深层中高温等。根据自身环境和产业特点,结合各区域采油厂废旧井对地热资源的梯级利用提出

建议。

3.2.1 地热发电

延长油气区内横山周边和靖边-延安一带发育一定规模的中深层中高温地热资源,地温已达到地热发电要求,可在这些区域尝试开展该领域应用。

3.2.2 地热水驱油

延长油气区属于典型的低渗透油田,注水开发是目前提高油气采收率采用的主要手段之一,截至2018年12月底,水驱储量占全油田动用储量的59.50%(张刚等,2020;王香增等,2022)。鉴于其他油田采用地热水驱油取得的良好效果,可在延长油气区中层中低温有利区和中深层中温有利区尝试该领域的地热资源利用。

3.2.3 集输伴热

为保障原油运输管道高效运行,油田集输伴热系统一般采用燃油(气)加热维持管道温度以保证原油流速。延长油气区中层中低温有利区和中深层中温有利区地热资源可为集输伴热系统提供维温水。

3.2.4 常规供暖

地热供暖是最常见的地热资源利用方式之一(刘文辉等,2023),对地热温度要求较低,延长油气区3种地热资源可为油田生产生活区及临近城市供暖。

3.2.5 发展第三产业

地热资源在供暖、工业利用之外,在水产养殖、大棚种植等方面也有很广泛的应用实例,为延长油气区提供了良好的借鉴。

3.2.6 风险防控

在地热资源开发利用的过程中,地下水作为载体,面临水位下降、水质污染等等潜在问题。目前,最为有效的解决办法就是在地热资源开发的同时,做好地下水回灌措施,维护地下水系统的采灌平衡。天津市滨海新区在废弃油井开发地热的过程中,采用“一采两灌”的开发模式,对回灌的尾水进行去铁、钙及细菌处理,同时加强地面净化措施,尽可能降低了回灌水对地下水的污染;经历了2688h的回灌试验,监测回灌能力达到96.35%,基本保持了地下水系统的采灌平衡,为油田废弃井开发地热资源提供了良好的借鉴(唐永香等,2019)。

4 结论

(1)位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡的延长油气区具

有较好的中低温地热资源潜力,区内主要有西部白垩系碎屑岩和东部石炭系—侏罗系碎屑岩两套热储层;岩石热导率与地层岩石的成岩程度、孔隙度等关系密切;地温梯度为2.73~3.50℃/100m,整体显示北高南低,与地层埋深呈正相关;大地热流值为57.28~86.18mW/m²,具有明显的东西向展布特征。

(2)延长油气区内地热资源分为3类,分别为靖边-吴起-志丹一带的浅层低温有利区、子洲-延安一带和延长-黄龙一带的中层中低温有利区以及横山周边和靖边-延安一带的中深层中温有利区。

(3)延长油气区内废弃钻井数量可观,在明确区内地热资源分布的基础上,合理地对这些废弃钻井进行改造,可在集输伴热、地热水驱油以及供暖和养殖、种植等方面实现地热资源梯级利用,助力推进“源网荷储一体化”的能源互联网构架建立。

参考文献(References):

- 陈驰,朱传庆,唐博宁,等.岩石热导率影响因素研究进展[J].地球物理学进展,2020,35(6):2047-2057.
- CHEN Chi, ZHU Chuanqing, TANG Boning, et al. Progress in the study of the influencing factors of rock thermal conductivity[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2047-2057.
- 董秋生,黄贤龙,郎振海,等.废弃油井改造为地热井技术分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):18-21.
- DONG Qiusheng, HUANG Xianlong, LANG Zhenhai, et al. Technical analysis of transforming abandoned oil wells into geothermal wells[J]. Exploration Engineering (Geotechnical Drilling Engineering), 2016, 43(6): 18-21.
- 韩勇,付斯一,陈洪德,等.鄂尔多斯盆地中东部马四段白云岩地球化学特征及成因模式[J].成都理工大学学报(自然科学版),2022,49(1):70-83.
- HAN Yong, FU Siyi, CHENG Hongde, et al. Geochemical characteristics and genetic model of Ordovician Ma-4 Member dolomite in central eastern Ordos Basin, China [J], Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(1): 70-83.
- 侯光才,张茂省,王永和,等.鄂尔多斯盆地地下水资源与开发利用[J].西北地质,2007,40(1):7-34.
- HOU Guangcai, ZHANG Maosheng, WANG Yonghe, et al. Groundwater Resources of the Ordos Basin and Its Development and Utilization[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(1): 7-34.
- 李锋,邹信波,王中华,等.海上稠油地热水驱提高采收率矿场实践——以珠江口盆地EP油田HJ油藏为例[J].中国海上油气,2021,33(1):104-112.

- LI Feng, ZOU Xinbo, WANG Zhonghua, et al. Field practice of offshore heavy oil geothermal water flooding for EOR: Taking HJ reservoir in EP oilfield in Pearl River Mouth basin as an example[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(1): 104–112.
- 李克文, 王磊, 毛小平, 等. 油田伴生地热资源评价与高效开发[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 32–41.
- LI Kewen, WANG Lei, MAO Xiaoping, et al. Evaluation and efficient development of geothermal resource associated with oil field[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 32–41.
- 李霄, 王晓光, 刘强, 等. 大庆石油勘探井改造地热井获得成功[J]. *地质与资源*, 2021, 30(1): 102.
- LI Xiao, WANG Xiaoguang, LIU Qiang, et al. Successful reconstruction of geothermal wells in Daqing petroleum exploration well[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(1): 102.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 312–321.
- LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312–321.
- 刘均荣, 于伟强, 李荣强. 油田地热资源开发利用技术探讨[J]. *中国石油勘探*, 2013, 18(5): 68–73.
- LIU Junrong, YU Weiqiang, LI Rongqiang. Discussion on technology for development and utilization of geothermal resources in oilfields[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(5): 68–73.
- 刘润川, 任战利, 叶汉青, 等. 地热资源潜力评价——以鄂尔多斯盆地部分地级市和重点层位为例[J]. *地质通报*, 2021, 40(4): 565–576.
- LIU Runchuan, REN Zhanli, YE Hanqing, et al. Potential evaluation of geothermal resources: exemplifying some municipalities and key strata in Ordos Basin as a study case[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 565–576.
- 刘文辉, 董英, 张新社, 等. 西北省会城市地热中深层地埋管供热系统发展潜力及环境效益分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 186–195.
- LIU Wenhui, DONG Ying, ZHANG Xinshe, et al. Development Potential and Environmental Benefit Analysis of Geothermal Medium-Deep Buried Pipe Heating System in Capital Cities in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 186–195.
- 吕毫龙, 马建国, 解红军, 等. 油田地热利用概况及对策建议[J]. *石油石化节能*, 2018, 8(8): 4.
- 饶松, 胡圣标, 朱传庆, 等. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(8): 2760–2770.
- RAO Song, HU Shengbiao, ZHU Chuanqing, et al. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, northwest China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(8): 2760–2770.
- 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(z1): 23–32.
- REN Zhanli, ZHANG Sheng, GAO Shengli, et al. Tectonic and thermal evolution history of the Ordos Basin and its significance for reservoir formation and mineralization[J]. *Science in China*, 2007, 37(z1): 23–32.
- 任战利, 于强, 崔军平, 等. 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的作用[J]. *地质前缘*, 2017, 24(3): 137–148.
- REN Zhanli, YU Qiang, CUI Junping, et al. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 137–148.
- 宋超凡, 赵军, 尹洪梅, 等. 碳中和背景下油田区地热资源的低成本可持续利用[J]. *华电技术*, 2021, 43(11): 66–73.
- SONG Chaofan, ZHAO Jun, YIN Hongmei, et al. Low-cost and sustainable utilization of geothermal resources in oilfields to achieve carbon neutrality[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(11): 66–73.
- 苏中堂, 胡孙龙, 刘国庆, 等. 鄂尔多斯盆地早古生代构造分异作用对碳酸盐岩沉积与规模性储层发育的控制[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(5): 513–532.
- SU Zhongtang, HU Sunlong, LIU Guoqing, et al. Carbonate deposition and scale reservoir development controlled by tectonic differentiation in early Paleozoic in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(5): 513–532.
- 唐永香, 李嫵嫵, 俞初安, 等. 油田区地热资源的集约化开发利用分析: 以滨海新区为例[J]. *中国矿业*, 2019, 28(4): 98–103.
- TANG Yongxiang, LI Yuanyuan, YU Reng'an, et al. Analysis of the intensive development and utilization of geothermal resources in Binhai New Area oil region[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(4): 98–103.
- 汪集旻, 邱楠生, 胡圣标, 等. 中国油田地热研究的进展和发展趋势[J]. *地质前缘*, 2017, 24(3): 1–11.
- WANG Jiyang, QIU Nansheng, HU Shengbiao, et al. Advancement and developmental trend in the geothermics of oil fields in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 1–11.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 2017, 38(4): 448–459.
- WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, 38(4): 448–459.
- 王学忠, 王建勇. 利用地热资源进行热水驱油的技术研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 885–891.
- WANG Xuezhong, WANG Jianyong. A study of the hot water oil expulsion technique for geothermal resources[J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 885–891.
- 王香增, 杨红, 王伟, 等. 延长油田低渗透油藏提高采收率技术进展[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(4): 7.

- WANG Xiangzeng, YANG Hong, WANG Wei, et al. Technical advancements in enhanced oil recovery in low permeability reservoirs of Yanchang Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(4): 7.
- 魏伟, 张金华, 王红岩. 中国石油地热开发利用模式及前景[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(1): 79–82.
- WEI Wei, ZHANG Jinhua, WANG Hongyan. Petroleum geothermal development and utilization model and prospect in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2012, 17(1): 79–82.
- 韦雅珍, 王凤清, 任宝玉. 华北油区地热排采技术研究[J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(S1): 93–95, 100.
- WEI Yazhen, WANG Fengqing, REN Baoyu. Research on geothermal drainage and production technology in North China oil region[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 2009, 31(S1): 93–95, 100.
- 徐怀颖, 张宝生. 环渤海及京津地区油田地热能利用的前景[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(4): 182–185.
- XU Huaiying, ZHANG Baosheng. Prospect of geothermal energy utilization in oilfields around the Bohai Sea and Beijing Tianjin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2012, 36(4): 182–185.
- 闫家泓, 王社教, 赵洋. 油区地热节能“宝藏”[J]. *中国石油石化*, 2007, (12): 54–55.
- YAN Jiahong, WANG Shejiao, ZHAO Yang. Geothermal energy saving “treasure” in oil areas[J]. *China Petrochem*, 2007, (12): 54–55.
- 杨文, 康帅, 李国营, 等. 安塞油田塞160区热水驱先导试验研究[J]. *石油地质与工程*, 2012, 26(6): 3.
- YANG Wen, KANG Shuai, LI Guoying, et al. Pilot study on hot water flooding in Sai 160 Block of Ansai Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2012, 26(6): 3.
- 杨学明, 雷清, 聂冀强, 等. 太行拱断束地热资源调查评价-基于大地电磁测深结果的分析[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 235–245.
- YANG Xueming, LEI Qing, NIE Jiqiang, et al. Investigation and Evaluation of Geothermal Resources of Taihang Arch Fault Cluster Based on the Magnetotelluric Exploration[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 235–245.
- 姚金剑. 大庆油田废弃井再利用途径探讨[J]. *石油石化节能*, 2020, 10(6): 31–33.
- YAO Jinjian. Discussion on reuse of abandoned wells in Daqing oilfield[J]. *Energy Conservation in Petroleum and Petrochemical Industry*, 2020, 10(6): 31–33.
- 尹立河, 侯光才, 张茂省, 等. 鄂尔多斯盆地地热系统[J]. *工程勘察*, 2008, (2): 34–38.
- YIN Lihe, HOU Guangcai, ZHANG Maosheng, et al. Geothermal system in Ordos Basin[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008, (2): 34–38.
- 张刚, 刘杰, 白耀文, 等. 延长油田注水开发技术研究及矿场实践[J]. *非常规油气*, 2020, 7(2): 88–93.
- ZHANG Gang, LIU Jie, BAI Yaowen, et al. Water injection optimization technology and mine practice of Yanchang oilfield[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2020, 7(2): 88–93.
- 张茂省, 董英, 孙萍萍, 等. 城乡融合与地上地下空间协同探测评价的理论与方法—以关中平原城市地质调查评价为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 153–168.
- ZHANG Maosheng, DONG Ying, SUN Pingping, et al. Theory and Method for Urban–Rural Integration, Evaluation and Cooperative Detection of Ground and Underground Space: Example from the Urban Geological Survey of Guanzhong Plain[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 153–168.
- 赵银鑫, 公亮, 吉卫波, 等. 宁夏银川市浅层地温能赋存条件和开发利用潜力评价[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 172–184.
- ZHAO Yinxin, GONG Liang, JI Weibo, et al. Conditions for the Occurrence and Development and Utilization Potential Evaluation of Shallow Geothermal Energy in Yinchuan City, Ningxia[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 172–184.
- 朱传庆, 陈驰, 杨亚波, 等. 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示[J]. *石油科学通报*, 2022, 3: 321–333.
- ZHU Chuanqing, CHEN Chi, YANG Yabo, et al. Experimental study into the factors influencing rock thermal conductivity and their significance to geothermal resource assessment[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 3: 321–333.
- 朱家玲, 汪健生, 张伟. 废弃石油井改造为地热井的发展现状[J]. *地热能*, 2013, (6): 3–6.
- ZHU Jialing, WANG Jiansheng, ZHANG Wei. Development status of transforming abandoned oil wells into geothermal wells[J]. *Geothermal Energy*, 2013, (6): 3–6.
- Cheng S, Kurnia J, Madise H, et al. Optimization of geothermal energy extraction from abandoned oil well with a novel well bottom curvature design utilizing Taguchi method[J]. *Energy*, 2019, 188: 116098.
- Wang S J, Yan J H, Li F, et al. Exploitation and utilization of oilfield geothermal resources in China[J]. *Energies*, 2016, 9(10): 798.