第 58 卷 第 3 期 2025 年 (总 241 期)

オヒ 西 地 质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 58 No. 3 2025(Sum241)



引文格式:冯旭亮,汪啸东,罗姣,等.鄂尔多斯盆地地热和氦气资源远景:来自居里面深度的证据[J].西北地质, 2025, 58(3): 22-32. DOI: 10.12401/j.nwg.2024114

Citation: FENG Xuliang, WANG Xiaodong, LUO Jiao, et al. Geothermal and Helium Resource Prospects in the Ordos Basin: Insight from the Curie Point Depths[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 22–32. DOI: 10.12401/j.nwg.2024114

鄂尔多斯盆地地热和氦气资源远景: 来自居里面深度的证据

冯旭亮^{1,2},汪啸东^{1,2},罗姣³,魏泽坤⁴,宗翔宇^{1,2},郭升^{1,2},罗通^{1,2}

(1. 西安石油大学,陕西省油气成藏地质学重点实验室,陕西西安 710065; 2. 西安石油大学地球科学与工程学院,陕西西安 710065; 3. 西安西北有色物化探总队有限公司,陕西西安 710068; 4. 陕西地矿物化探队有限公司,陕西西安 710043)

摘 要:鄂尔多斯盆地是一个多种资源富集的大型多旋回叠合盆地,居里面深度可为研究该盆地 地壳热结构及氦气等资源分布提供依据。笔者在分析鄂尔多斯盆地磁力异常特征的基础上,利 用功率谱法采用了多种窗口大小和移动步长计算了居里面深度,将其平均值确定为最终的居里 面深度。结合地热及氦气分布等资料,分析了鄂尔多斯盆地居里面深度特征。鄂尔多斯盆地居 里面深度为18~30 km,平均深度为23 km,盆地内居里面深度变化相对较小,表明鄂尔多斯盆地 构造较为稳定,自盆地形成之后没有发生大的热活动。与长庆油田区地温资料的对比表明,鄂 尔多斯盆地居里面深度变化与地温场特征较为一致,盆地北部伊盟隆起、盆地西部银川--靖边一 带、盆地东南缘宜川-黄龙一带为居里面隆起区,推测地热资源潜力较大。鄂尔多斯盆地居里面 深度与氦气含量具有明显的相关性,氦气含量越高,居里面越浅,推测是由盆地内氦源岩中U、 Th元素放射性衰变生热引起的。根据居里面深度特征,盆地内除黄龙气田、东胜气田、苏里格气 田西区、苏里格气田南区外,庆阳-环县-华池一带以及志丹-靖边一带可能也是潜在的氦气富集区。 关键词:居里面深度;磁力异常;功率谱法;地热;氦气;鄂尔多斯盆地

中图分类号: P631 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2025)03-0022-11

Geothermal and Helium Resource Prospects in the Ordos Basin: Insight from the Curie Point Depths

FENG Xuliang^{1,2}, WANG Xiaodong^{1,2}, LUO Jiao³, WEI Zekun⁴, ZONG Xiangyu^{1,2}, GUO Sheng^{1,2}, LUO Tong^{1,2}

 (1. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. Xi'an Northwest Nonferrous Geophysical & Geochemical Exploration Brigade Co. Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Geophysical and Geochemical Exploration Team Co. Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: The Ordos basin is a polycyclic superposition basin characterized by a diverse array of resources.

收稿日期: 2024-10-17; 修回日期: 2024-12-22; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目:国家自然科学基金项目"基于不同范数的密度界面三维重力反演研究"(41904115),陕西燃气集团委托课题"渭河 盆地华州--华阴地区氦源岩空间分布特征研究"(0102/290024512)联合资助。

作者简介: 冯旭亮(1989-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事重、磁勘探方法理论与应用及构造地球物理综合解释研究。 E-mail: fxlchd@163.com。

The depth to the Curie point (CPD) serves as crucial evidence for investigating the crustal thermal structure and helium resource distribution within this basin. Through an analysis of magnetic anomaly characteristics in the Ordos basin, we calculated CPDs utilizing the power spectrum method with varying window sizes and moving steps, ultimately determining the average CPD as our final value. We analyzed CPD characteristics in conjunction with geothermal data and helium distribution. The CPD in the Ordos Basin ranges from 18 to 30 km, with an average depth of 23 km. This relatively minor variation in CPD suggests that the structural integrity of the Ordos Basin remains stable, indicating no significant thermal activity has transpired since its formation. A comparison with geothermal data from Changqing Oilfield reveals that variations in CPD align closely with observed geothermal features. Uplift areas associated with shallower CPDs include Yimeng uplift to the north, regions from Yinchuan to Jingbian on the western flank, and areas extending from Yichuan to Huanglong along the southeastern margin; these zones are presumed to possess enhanced geothermal resource potential. Notably, there exists a clear correlation between CPD values in the Ordos Basin and helium concentrations found within natural gas; higher helium content corresponds to shallower CPDs: a phenomenon likely attributable to radioactive decay processes involving uranium (U) and thorium (Th) present within source rocks throughout this basin. Based on these findings regarding CPD characteristics, in addition to Huanglong gas field, Dongsheng gas field, the west of Sulige gas field and the south of Sulige gas field, Qingyang-Huanxian-Huachi area and Zhidan-Jingbian area may also area may also represent prospective helium-rich zones within the Ordos Basin.

Keywords: Curie point depth; magnetic anomaly; power spectral method; geothermal energy; helium; Ordos basin

鄂尔多斯盆地是在新太古界—古元古界结晶基 底之上发育而成的多旋回叠合盆地(包洪平等, 2022)。 鄂尔多斯盆地油气勘探开发已历经50余年,相继探 明了陕北、姬塬、陇东、华庆4个10亿吨级大油区和 下古生界碳酸盐岩、苏里格、盆地东部3个万亿方大 气区(付金华等, 2023)。近年来, 鄂尔多斯盆地东胜 气田、苏里格气田、庆阳气田、宜川气田等相继发现 了氦气(何发岐等, 2022; 范立勇等, 2023; 刘成林等, 2023)(图1)。鄂尔多斯盆地各气田内氦气含量相差 较大(刘成林等, 2023), 范立勇等(2023)基于磁力资 料与氦气含量的关系认为盆地中部平凉-庆阳-延安-佳县一带的 NE 向高磁异常条带为盆地主要的氦气分 布区, 而刘成林等(2023) 通过对鄂尔多斯盆地各类氦 源岩特征及生氦潜力分析,认为盆地西南部是潜在的 富氦天然气区。可见,目前对于鄂尔多斯盆地氦气分 布特征并未形成统一的认识。鄂尔多斯盆地内也显 示出一定的地热资源潜力(郭路等, 2023),但目前对 于盆地地热资源的形成和分布多集中在盆地周缘构 造边界带内(王贵玲等, 2004; 陈晓晶等, 2021), 盆地 内部仅涉及部分地级市(刘润川等, 2021)及油田区 (汪集旸等, 2017; 郭路等, 2023), 鲜有针对整个鄂尔 多斯盆地(特别是盆地内部)地热资源远景分析等相 关研究。





图1 鄂尔多斯盆地已发现的天然气田氦气丰度与热流图 Fig. 1 Helium content and heat flow in Ordos basin

大中型能源盆地的形成和演化主要受地球深部 动力学作用的控制,盆地深部作用均与能源矿产的赋 存、富集和分布密切相关(鲁宝亮等, 2016)。居里面 深度是岩石圈磁性底界面深度,大致相当于 580 ℃ 的 等温线所在深度,是研究区域热状态的重要参数(Li et al., 2010)。相比于稀疏、分布均匀且易受其他因素影 响的热流测量,由磁异常数据反演得到的居里面深度 覆盖范围广且分布均匀,可以更好地反映区域深部的 热状态(Li et al., 2016; Andrés et al., 2018)。目前, 涉及 鄂尔多斯盆地居里面深度反演的相关研究较少,在基 于1:100万全国陆域航磁异常数据采用功率谱法计 算的居里面深度(熊盛青等, 2016)显示鄂尔多斯盆地 中北部存在两个居里面坳陷区,深度为28~36 km,其 周围的居里面隆起区埋深为 20~26 km。Xu 等(2017) 利用 EMAG2 全球磁力数据利用功率谱法计算了华北 克拉通居里面深度,结果显示鄂尔多斯盆地居里面深 度为 22~30 km, 居里面隆起区主要位于南部并在盆 地中部呈 NW 向条带展布。然而,由1:100 万航磁 数据利用功率谱法计算的青藏高原东北缘及邻区居 里面深度(Gao et al., 2021)显示,鄂尔多斯盆地居里面 最大深度可达 42 km, 居里面深度及起伏特征与 Gao 等(2015)利用连续模型反演方法计算的鄂尔多斯盆 地居里面深度特征一致, 坳陷区主要位于盆地中南部 呈北东向展布以及在北部呈东西向展布,居里面最浅 埋深约为 30 km, 但隆起区位置却与 Xu 等(2017)计算 的居里面坳陷区分布范围大致相同。

研究鄂尔多斯盆地磁力异常特征,并计算居里面 深度,可为研究该盆地地壳热结构、分析地球动力学 过程及氦气、地热等资源分布规律等提供依据。笔者 基于鄂尔多斯盆地1:20万航磁资料,利用功率谱法 计算了居里面深度。为提高居里面分辨率,笔者采用 了3个不同尺寸的窗口进行计算,并将其平均值作为 最终的居里面。结合鄂尔多斯盆地公开发表的热流 数据、长庆油田区地热资料及各气田氦气含量等资料, 分析了鄂尔多斯盆地地热及氦气资源远景。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是一个构造简单的大型多旋回克 拉通盆地,面积约为37×10⁴km²(付金华等,2023)。在 太古宙—古元古代形成的结晶基底之上,经历了中— 新元古代拗拉谷、早古生代浅海台地、晚古生代近海 平原、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷五大沉积演 化阶段(何自新等,2003;弓汶琪等,2025)。盆地周缘 均以断裂为边界,盆地内部构造面貌表现南北隆升、 东抬西冲,向西倾斜的大单斜构造(范立勇等,2024)。 根据盆地现今构造发育特征可划分为伊盟隆起、西缘 冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带和渭北隆 起6个一级构造单元(杨华等,2000;孙涛等,2024) (图1)。

根据地球物理资料、锆石测年、地下热流值等资 料对鄂尔多斯盆地基底特征的研究结果表明,鄂尔多 斯地块并非是一个完整的地块,其具有明显的不均一 性,盆地基底是由多个不同岩性、不同时代、不同变 质程度的块体拼接、固化而形成的(魏国齐等,2019)。 盆地基底岩石组成极为复杂,大多经历了较强的区域 变质作用,变质程度一般达到(高)角闪岩相-麻粒岩 相,主要是各种片岩、片麻岩、变粒岩、石英岩、大理 岩及花岗片麻岩等(包洪平等,2019)。鄂尔多斯盆地 基底结构整体受基底一级断裂控制,各构造单元与周 缘太古界—古元古界崗盆内的延伸,从北向南依次为乌 拉山群、上集宁群、恒山-吕梁群、界河口群、涑水-中条群,具有北东横向分块、纵向分层的结构特征(田 刚等,2024)。

鄂尔多斯块体内的地温梯度相对周缘地区为低 值区,呈现南高北低的变化趋势(王贵玲等,2004)。 地温梯度最高的地区为庆阳-华池-永宁-安塞一线, 地温梯度为 3.0 ℃/100 m;其次为杭锦旗--靖边-米脂-佳县地区,地温梯度为 2.9~3.0 ℃/100 m;地温梯度最 低的地区是神木-乌审旗-鄂托克前旗以北地区到伊 盟隆起以南,地温梯度为 2.7 ℃/100 m(刘润川等, 2021)。其中,盆地中部延长油气区地温梯度为 2.73~3.50 ℃/100 m,具有明显的 EW 向展布特征(白 奋飞等,2023)。渭北隆起多口钻井实测的地层温度 随地层埋深的增加而呈线性增高,表现出典型的传导 型地温场特征,平均地温梯度为 3.12 ℃/100 m(曹展鹏 等,2016)。

2 研究方法

2.1 磁力异常特征

笔者收集了鄂尔多斯盆地航磁资料用于居里面 深度计算,其中盆地主体部分为1:20万航磁数据,

盆地外围有部分1:10万航磁数据。鄂尔多斯盆地化 极磁力异常(图 2)整体呈正负相间分布的特征,主要 以EW、NE向展布的条带状磁异常为特征。盆地基 底以高级变质片麻岩和变粒岩为主的太古界变质岩 系具有强磁性,磁化率为(1300~10600)×10⁻⁵ SI,以 混合岩和大理岩为主的下元古界变质岩系磁性整体 偏弱,磁化率为(5~245)×10⁻⁵ SI(田刚等, 2024)。另 外,鄂尔多斯盆地内被厚度很大的震旦系--古生界和 中新生界充填,这套地层以碳酸盐岩和陆相碎屑岩为 主, 磁性很弱, 磁化率为 $(5~41)\times10^{-5}$ SI(李冰等, 2019)。可见,鄂尔多斯盆地的高磁异常可能主要代 表了以火山岩变质为主的基底属性,而低磁异常区主 要代表了沉积变质的基底部分(包洪平等, 2019)。因 此,鄂尔多斯盆地的磁力异常在一定程度上反映出了 盆地基底结构 NE 向的构造格局, 自北向南存在 3 个 高磁异常区和两个低磁异常区。



图2 鄂尔多斯盆地化极磁力异常图 Fig. 2 The magnetic anomaly reduced to the pole in Ordos basin

盆地北部伊盟隆起为高磁异常区,存在多条大型 EW向的高磁异常条带,北部边缘贯穿一条 EW向的 高磁异常条带,杭锦旗和鄂尔多斯一带的大型高磁异 常条带呈略向南凸的 EW 弧形分布。盆地中部平凉-志丹-佳县存在 NE 向展布的高磁异常区,其从盆地西 南缘一直延伸至盆地东缘并有向外延伸的趋势,可能 是早期陆核的反映。盆地东南部渭南-河津一带的 NE向高磁异常区存在涑水岩群等出露,该高磁异常 可能是盆地边部老地层隆起的反映。在3个高磁异 常中间分布有两个低磁异常区,分别位于盆地中部银 川-乌审旗-神木一带以及盆地南部彬州-黄陵一带, 该带东部盆缘出露含石墨大理岩、变泥砂质岩石和少 量的斜长角闪岩组成的界河口群,其形成于鄂尔多斯 地块中南部在俯冲-弧后伸展作用下导致新太古代末 期 NE 向拼合的多条先存断裂带再次复活拉张(田刚 等,2024)。

2.2 居里面深度计算

目前基于磁异常计算居里面深度的方法主要有 基于单体磁异常的谱分析方法和基于统计磁异常 分析的方法这两大类(熊盛青等,2016)。这些方法中, 频率域高阶导数功率谱法(Spector et al., 1970; Blakely, 1988)得到了广泛的应用(Li et al., 2010; 熊盛青等, 2016; Gao et al., 2021; Awoyemi et al., 2022; 张健等, 2023)。居里面的计算公式(张健等, 2023)如下 所示。

$$\theta_{\Delta T} = ae^{-2k_{\lambda}Z_{t}}(1 - e^{-k_{\lambda}(Z_{b} - Z_{t})})^{2}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \ln\left[\theta_{\Delta T}^{1/2}\right] = \ln b - k_{\lambda}Z_{t} & (高频谱段) \\ \ln\left[\frac{\theta_{\Delta T}^{1/2}}{k_{\lambda}}\right] = \ln c - k_{\lambda}Z_{0} & (低频谱段) \end{cases}$$
(1)

式中: $\theta_{\Delta T}$ 是磁异常 ΔT 的功率谱径向平均;a、b、c为可选常数; k_{λ} 为波数; Z_{t} 、 Z_{b} 分别是磁性体顶、底界面深度; Z_{0} 是磁性层的中间深度。

功率谱法计算居里面深度时采用窗口进行计算, 在每个窗口中利用(1)式在高频谱段由磁异常功率谱 斜率估算Z_i,在低频谱段根据拟合曲线的斜率估算Z₀, 之后由Z_b = 2Z₀ - Z_i得到窗口内磁性体底界面深度(即 居里面深度),最后插值得到整个研究区居里面深度。

利用功率谱法计算居里面深度时,窗口大小的选取非常重要。如果窗口过大,则计算的居里面深度的分辨率不足;相反,如果窗口太小,则可能会损失深部场源体的信息(Li et al., 2010)。窗口大小一般采用多次试算确定,常使用的窗口尺寸为60 km×60 km~150 km×150 km(Saada,2016)。Herrera等(2022)使用7个不同尺寸的方形窗口(最小尺寸为100 km×100 km、最大尺寸为400 km×400 km)进行了综合测试,结果显示当窗口尺寸超过200 km时,居里面计算结果变化最小,这意味着进一步增大窗口不会明显影响居里面反演结果。Li等(2018)计算整个太平洋地区居里面时采用100.8 km×100.8 km和201.6 km×201.6 km两种不同

的窗口尺寸以及相应的移动步长 50.6 km 和 67.2 km, 将不同窗口大小的结果进行平均而得到了最终的居 里面深度,可在保留深部场源信息的同时提高居里 面的分辨率。徐柳娜等(2023)计算红海和加利福 尼亚湾居里面深度时分别利用了 99.2 km×99.2 km、 148.8 km×148.8 km 和 198.4 km×198.4 km 等 3 个尺寸 的窗口,并将3个计算结果的平均深度作为最终的居里面深度。考虑到鄂尔多斯盆地构造较为稳定,居里面深度相对较大,笔者分别采用100 km×100 km、150 km× 150 km和200 km×200 km窗口大小计算居里面深度,相应的移动步长分别为50 km、75 km和100 km,计算 得到的居里面深度如图3a~图3c 所示。最终的居里



a. 采用 100 km×100 km 窗口计算的居里面深度; b. 采用 150 km×150 km 窗口计算的居里面深度; c. 采用 200 km×200 km 窗口计算的居里面深度; d.居里面深度平均值

图3 鄂尔多斯盆地居里面深度图

Fig. 3 The Curie point depth in Ordos basin

面深度为这3个计算结果的平均值(图 3d)。

3 计算结果及分析

3.1 居里面深度特征

鄂尔多斯盆地居里面(图 3d)深度为 18~30 km, 平均深度为23 km,整体呈现西北浅、东南深的特征。 盆地北部伊盟隆起整体为居里面隆起区,且为整个盆 地居里面最浅的区域,该隆起区一直向北东延伸至盆 地外围。研究区西部整体为居里面隆起区,呈南北走 向向南延伸至海原一带,银川附近该隆起区向南东方 向延伸至靖边一带。盆地西南缘平凉--陇县一带,为 居里面坳陷区,此处也为盆地居里面最深的区域。盆 地东南缘的宜川-黄龙一带,为居里面的隆起区,该隆 起区一直延伸至三门峡一带。整体而言,盆地内居里 面深度变化相对较小,但盆地周缘居里面深度变化较 大,这也符合盆地构造比较稳定、但周缘活动较为强 烈的特征。上述居里面隆起区和坳陷区将盆地的主 体部分分隔为两个坳陷区和两个隆起区,盆地中部鄂 托克旗-榆林-神木一带及定边-环县-彬州一带均为 居里面坳陷区,二者之间被 NW 走向的银川--靖边隆 起区分隔。正宁-延安-绥德一带为北东向狭长的坳 陷区,其将上述两个坳陷区连通起来。

Gao等(2015)计算结果中,伊盟隆起为明显的居 里面坳陷区,最大深度约为38km,与笔者计算结果差 异较大。熊盛青等(2016)基于1:100万全国陆域航 磁异常数据采用功率谱法计算的居里面深度显 示鄂尔多斯盆地居里面以坳陷特征为主,深度为28~ 36km,隆起区主要分布在东胜、定边东部等地,深度 为20~26km。文中反演结果与熊盛青等(2016)的居 里面起伏变化基本一致,盆地内隆起区也主要分布在 中部定边-靖边及北部的鄂尔多斯-包头一带,隆起区 深度为18~24km,深度稍浅,此外居里面起伏变化细 节有所不同。笔者计算结果与Xu等(2017)计算的居 里面趋势基本一致,深度上有一定差异,但笔者采用 不同窗口大小计算居里面深度并进行叠加,使得最终 的居里面深度细节更为丰富,有利于盆地深部热状态 及构造特征研究。

3.2 居里面深度与热流的相关性

居里面是地壳内部地质体失去磁性的深度,可视 为地壳磁性层的底界。不同铁磁性物质的居里温度 不同,一般认为地壳平均居里温度为 580 ℃,因此居 里面深度可以提供地壳或上地幔内温度状态的重要 信息。为分析鄂尔多斯盆地居里面特征,笔者通过中 国大地热流数据库(https://chfdb.xyz/show.html)收集了 研究区内热流值,共47个数据点(图1),研究区内热 流与居里面深度的散点图如图4所示。可以看出,热 流与居里面深度呈反比关系,即居里面越浅,热流值 越高。



图4 鄂尔多斯盆地热流与居里面深度的相关性 Fig. 4 Correlation between heat flow and Curie point depth in

Ordos basin

假设放射性产热随深度呈指数递减,则从稳态热 传导方程中可以得到一个简化的关系(Stüwe, 2002; Turcotte et al., 2002):

$$q_s \approx k \frac{T_c}{Z_b} + S_r \tag{2}$$

式中: q_s 为热流(mW/m²);k为热导率(Wm⁻¹K⁻¹); T_c 是居里温度(\mathbb{C}),文中取 580 \mathbb{C} ; Z_b 是居里面深度; S_r 表示放射性热源的贡献。

k分别取 2.0、2.5、3.0, 绘制热流和居里面深度的 理论曲线(图 4)。可以看出数据点主要集中在k = 2.0和k = 3.0之间。根据长庆油区内各储层主要物性参数 (郭路等, 2023), 安定组和直罗组热导率为 2.06 Wm⁻¹K⁻¹, 延安组热导率为 2.42 Wm⁻¹K⁻¹, 延长组和纸 坊组热导率为 2.49 Wm⁻¹K⁻¹。可见, 图 4 的计算结果 与实测值较为吻合。

3.3 居里面深度与地热资源

鄂尔多斯盆地中部偏西的长庆油田区地温梯度 大体呈西高东低特点(郭路等,2023),将笔者反演的 居里面深度与长庆油田区地温梯度及2500m深度处 地层温度进行对比(图5)。长庆油田区地温梯度主要 为2.2~3.0℃/100m(图5a),地温梯度大于3.0℃/100 m的地热异常高区范围较小,主要分布在图幅西北角 定边以西的区域以及图幅东南黄陵一带;地温梯度小 于2.6℃/100m的区域主要分布在定边-环县-镇原一 带;其余大部分地区地温梯度为2.6~3.0℃/100m。



a. 地温梯度; b. 2500 m 深度处地层温度

图5 长庆油田区内居里面深度与地温梯度及 2 500 m 深度 处地层温度(郭路等, 2023)



一般而言,居里面越浅,地温梯度越高。在长庆油田 区,笔者计算的居里面在图幅西北角的定边以西地区 以及东南角黄陵-洛川一带深度较浅,这与由测温井 得到的地温梯度等值线变化趋势是一致的。居里面 反演结果中,环县以南以及靖边一带出现居里面的隆 起区,但地温梯度值较低。然而,该地温数据是基于 12口测温井的结果进行3次埃尔米特插值法得到的 (郭路等,2023),在这些区域并无测温井,这可能是导 致居里面深度与地温梯度数据不一致的原因。2500 m 深度处地温温度主要为65~80 ℃(图5b),其变化趋 势与地温梯度基本一致,也与笔者反演的居里面深度 变化趋势一致。可见,笔者反演的居里面深度是较为 可靠的,并且与由测温井获得地温信息相比,具有数 据覆盖广且分布均匀的特征,能更好地反映区域深部 的热状态。

对比结果表明(图5),鄂尔多斯盆地居里面深度 变化与地温场特征较为一致,因此居里面隆起区在一 定程度上可以反映地热资源远景区。居里面深度计 算结果中,盆地北部伊盟隆起、盆地西部银川--靖边一 带、盆地东南缘宜-黄龙一带为居里面的隆起区,表明 这些区域为盆地地热资源远景区。银川盆地多个钻 孔测温曲线表明盆地内地热异常明显,地温梯度异常 呈 NW 向展布, 东部隆起区地温梯度为 2.0~4.4 ℃/ 100 m(陈晓晶等, 2021); 天山海世界地热田 DRT-03 钻孔深度 1 690 m 处, 温度可达 64.03 ℃(陈晓晶等, 2021), 钻孔中地温梯度最高可达 5.04 ℃/100 m(虎新 军等, 2022)。近年来, 银川盆地大量的地质地球物理 工作结果揭示了盆地地热成因模式,表明了银川盆地 具有较大的地热资源勘探潜力(仵阳等, 2024)。盆地 东南缘宜川-黄龙一带居里面隆起区一直延伸至临汾-运城盆地,该盆地内分布有多个地热田(韩颖等, 2018), 井口温度为 25~113.85 ℃(司庆红等, 2023), 地震测深和大地电磁测深资料计算的剖面温度场模 型发现地区地温梯度值为 2.0~2.7 ℃/100 m, 埋深 10~15 km 处地温梯度可达 4.0 ℃/100 m(吴乾蕃等, 1993)。这些研究成果均表明,在文中居里面深度计 算结果中,隆起区地热资源潜力较大。

3.4 居里面与氦气分布

氦是已知的具最低熔点和沸点的元素,来源于铀、 钍放射性衰变和地幔脱气,是重要的战略性稀有气体 资源,国内四川、塔里木、鄂尔多斯、柴达木等叠合盆 地中均发现了丰富的氦气显示(许光等,2023)。鄂尔 多斯盆地天然气资源丰富,并且天然气具有较高的含 氦量。其中,东胜气田氦气平均含量为0.133%,苏里 格气田东区、中区、西区和南区均为0.042%~0.108%, 榆林气田为0.032%,神木气田为0.029%,子洲米脂气 田为0.041%,黄龙气田为0.233%,庆阳气田为0.068% (刘成林等,2023)。根据含氦天然气样品采集点位置 (刘成林等,2023),从反演的居里面深度中提取了各 气田天然气样品采集点位置处的居里面深度,并计算 其平均值作为各气田居里面深度,其与氦气含量的关 系如图6所示。该结果表明居里面深度与氦气含量 具有明显的相关性,氦气含量越高,居里面越浅,反之, 居里面越深。将图1所示的热流进行插值,并从中提 取了各气田热流,结果显示东胜气田、庆阳气田、黄 龙气田、子洲米脂气田、榆林气田和神木气田的热流 与氦气含量呈正相关,即氦气含量越高,热流越大;但 苏里格气田(包括西区、东区、中区、南区)氦气含量 与热流之间并无相关关系。从热流数据分布(图1)来 看,鄂尔多斯盆地实际热流数据非常少,特别是在苏 里格气田内并无实际热流数据,这也是图6中由实测 热流数据插值结果提取的热流与氦气含量无相关关 系的主要原因。由公式(2)的热流与居里面深度关系 可从居里面深度中计算得到各气田热流,取k=2.5计 算得到各气田的热流如图6中蓝色实线所示,可以看 出,各气田内氦气含量与热流之间均明显呈正相关。







天然气样品中氦同位素值表明,鄂尔多斯盆地内 的氦为典型的壳源氦(戴金星等,2005;孙晓等,2021; 何发岐等,2022)。壳源氦气资源基本来源于U、Th 元素的放射性衰变,盆地基底、岩体、沉积地层都可 成为潜在的氦源,但大多数地质体都是"贫乏"的氦 源岩,花岗岩类(酸性岩)、铝土岩等U、Th含量较高, 是优质的氦源岩(李玉宏等,2022)。鄂尔多斯盆地基 底太古界—古元古界富含U、Th元素的花岗岩和花 岗片麻岩等变质岩、下古生界泥质含量较高的碳酸盐 岩等均是盆地潜在的氦源岩,盆地具有多源供氦特征, 生氦强度大(刘成林等,2023)。U、Th元素在放射性 衰变过程中,会释放热量,是盆地高热流和高地温梯 度的重要因素,这一现象在渭河盆地、临汾—运城盆 地中也得到了证实(刘建朝等,2009;司庆红等,2023)。 由于鄂尔多斯盆地构造比较稳定,自其形成开始,盆 地内部并未有大型的构造活动。因此,鄂尔多斯盆地 中居里面深度与氦气含量之间呈现明显相关性的主 要原因可能是盆地内的氦源岩中U、Th元素放射性 衰变产生热量。仅从居里面深度考虑,鄂尔多斯盆地 内黄龙气田、东胜气田、苏里格气田西区、苏里格气 田南区仍然是盆地内氦气的主要富集区。此外,庆阳– 环县--华池一带以及志丹--靖边一带为居里面隆起区, 可能也是潜在的氦气富集区。

4 结论

(1)鄂尔多斯盆地居里面深度为 18~30 km, 平均 深度为 23 km, 盆地内居里面深度变化相对较小, 盆地 的主体部分包括两个坳陷区和两个隆起区。居里面 深度与热流呈反比关系, 即居里面越浅, 热流值越高。

(2)鄂尔多斯盆地居里面深度变化与地温场特征 较为一致,居里面隆起区在一定程度上可以反映地热 资源远景区。在文中居里面深度计算结果中,盆地北 部伊盟隆起、盆地西部银川-靖边一带、盆地东南缘 宜川-黄龙一带为居里面隆起区,地热资源潜力较大。

(3)鄂尔多斯盆地居里面深度与氦气含量具有明显的相关性,氦气含量越高,居里面越浅,推测是由盆地内氦源岩中U、Th元素放射性衰变生热引起的。 仅从居里面深度考虑,鄂尔多斯盆地内黄龙气田、东 胜气田、苏里格气田西区、苏里格气田南区仍然是盆 地内氦气的主要富集区。此外,庆阳-环县-华池一带 以及志丹-靖边一带可能也是潜在的氦气富集区。

参考文献(References):

- 白奋飞,魏登峰,韩伟,等.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[J].西北地质,2023,56(6): 329-339.
- BAI Fenfei, WEI Dengfeng, HAN Wei, et al. Occurrence characteristics and exploitation of geothermal resources in Yanchang oil and gas area of Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 329–339.
- 包洪平,何登发,王前平,等.鄂尔多斯盆地四大古隆起演化及 其油气控藏意义的差异[J].古地理学报,2022,24(5): 951-969.

- BAO Hongping, HE Dengfa, WANG Qianping, et al. Four main paleouplifts evolution in Ordos Basin and their differences in significance of oil and gas reservoir control[J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(5): 951–969.
- 包洪平, 邵东波, 郝松立, 等. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 33-43.
- BAO Hongping, SHAO Dongbo, HAO Songli, et al. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 33–43.
- 曹展鹏,任战利,熊平,等.鄂尔多斯盆地渭北隆起西南缘奥陶 系热演化史恢复与生烃史[J].地质学报,2016,90(3): 513-520.
- CAO Zhanpeng, REN Zhanli, XIONG Ping, et al. The Ordovician thermal evolution and hydrocarbon generation history in the southwestern margin of Weibei Uplifting of the Ordos Basin: A case study of the Linyou-Xunyi region[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(3): 513–520.
- 陈晓晶,虎新军,李宁生,等.银川盆地东缘地热成藏模式探讨 [J].物探与化探,2021,45(3):583-589.
- CHEN Xiaojing, HU Xinjun, LI Ningsheng, et al. A discussion on geothermal accumulation model on the eastern margin of Yinchuan Basin[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 583–589.
- 戴金星,李剑, 候路. 鄂尔多斯盆地氦同位素的特征[J]. 高校地 质学报, 2005, 11(4): 473-478.
- DAI Jinxing, LI Jian, HOU Lu. Characteristics of helium isotopes in the Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 473–478.
- 范立勇,单长安,李进步,等.基于磁力资料的鄂尔多斯盆地氦 气分布规律[J].天然气地球科学,2023,34(10):1780-1789.
- FAN Liyong, SHAN Chang'an, LI Jinbu, et al. Distribution of helium resources in Ordos Basin based on magnetic data[J]. Nature Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1780–1789.
- 范立勇,祁凯,刘新社,等.鄂尔多斯盆地中上元古界—下古生 界热演化程度:来自伊利石结晶度及伊蒙混层的指示[J]. 地质科学,2024,59(3):673-682.
- FAN Liyong, QI Kai, LIU Xinshe, et al. The degree of thermal evolution of the Middle-Upper Proterozoic to Lower Paleozoic in the Ordos Basin: Constraints from illite crystallinity and I/S mixedlayer[J]. Chinese Journal of Geology, 2024, 59(3): 673–682.
- 付金华,赵会涛,董国栋,等.鄂尔多斯盆地新领域油气勘探开 发与前景展望[J]. 天然气地球科学,2023,34(8): 1289-1304.
- FU Jinhua, ZHAO Huitao, DONG Guodong, et al. Discovery and prospect of oil and gas exploration in new areas of Ordos

Basin[J]. Nature Gas Geoscience, 2023, 34(8): 1289-1304.

- 郭路,夏岩,段晨阳,等.长庆油田区中深层地热资源储量评价[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):749-756.
- GUO Lu, XIA Yan, DUAN Chenyang, et al. Evaluation of middle and deep geothermal resources reserves in Changqing Oilfield [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 749–756.
- 弓汶琪,弓虎军,王苏里,等.鄂尔多斯盆地东南部延长组中期物源分析及其对秦岭造山带隆升作用的指示[J].西北地质,2025,58(1):118-134.
- GONG Wenqi, GONG Hujun, WANG Suli, et al. Provenance Analysis of Middle Yanchang Formation in the Southeastern Ordos Basin and Its Indications for the Uplift of the Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 118–134.
- 韩颖,白雪峰,张欣,等.山西省地热资源及其开发利用模式探讨[J].中国地质调查,2018,5(5):13-20.
- HAN Ying, BAI Xuefeng, ZHANG Xin. Discussion on geothermal resources and its exploitation and utilization model in Shanxi Province[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(5): 13–20.
- 何发岐,王付斌,王杰,等.鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规 律及特大型富氦气田的发现[J].石油实验地质,2022, 44(1):1-10.
- HE Faqi, WANG Fubin, WANG Jie, et al. Helium distribution of Dongsheng gas field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 1–10.
- 何自新,付金华,席胜利,等.苏里格大气田成藏地质特征[J]. 石油学报,2003,24(2):6-12.
- HE Zixin, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 6–12.
- 虎新军,陈晓晶,仵阳,等.综合地球物理技术在银川盆地东缘 地热研究中的应用[J].物探与化探,2022,46(4):845-853.
- HU Xinjun, CHEN Xiaojing, WU Yang, et al. Application of comprehensive geophysical exploration in geothermal resources on the eastern margin of Yinchuan Basin[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 845–853.
- 李冰, 宋燕兵, 石磊, 等. 鄂尔多斯盆地的磁场特征及地质意义 [J]. 物探与化探, 2019, 43(4): 767-777.
- LI Bing, SONG Yanbing, SHI Lei, et al. Characteristics of gravity and magnetic fields in Ordos Basin and their geological significance[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 767–777.
- 李玉宏,张国伟,周俊林,等.氦气资源调查理论与技术研究现 状及建议[J].西北地质,2022,55(4):1-10.
- LI Yuhong, ZHANG Guowei, ZHOU Junlin, et al. Research status and suggestions on helium resources investigation theory and

technology[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 1–10.

- 刘成林,丁振刚,陈践发,等.鄂尔多斯盆地氦源岩特征及生氦 潜力[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1546-1554.
- LIU Chenglin, DING Zhengang, CHEN Jianfa, et al. Characteristics and helium-generating potential of helium source rocks in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1546–1554.
- 刘建朝,李荣西,魏刚峰,等.渭河盆地地热水水溶氦气成因与 来源研究[J].地质科技情报,2009,28(6):84-88.
- LIU Jianchao, LI Rongxi, WEI Gangfeng, et al. Origin and source of soluble helium gas in geothermal water, Weihe basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(6): 84–88.
- 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.
- 鲁宝亮,王万银,张功成,等. 南海深部过程及与含油气盆地耦 合关系研究进展[J]. 地球物理学进展,2016,31(3):1342-1350.
- LU Baoliang, WANG Wanyin, ZHANG Gongcheng, et al. Overview of the deep processes and their coupling relationships with the petroliferous basins in the South China Sea[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1342–1350.
- 司庆红,曾威,刘行,等.临汾-运城盆地氦气富集要素及成藏条件[J].西北地质,2023,56(1):129-141.
- SI Qinghong, ZENG Wei, LIU Xing, et al. Analysis of helium enrichment factors and reservoir forming conditions in Linfen-Yuncheng Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 129–141.
- 孙晓,王杰,陶成,等.鄂尔多斯盆地大牛地下古生界天然气地 球化学特征及其来源综合判识[J].石油实验地质,2021, 43(2):307-314.
- SUN Xiao, WANG Jie, TAO Cheng, et al. Evaluation of geochemical characteristics and source of natural gas in Lower Paleozoic, Daniudi area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 307–314.
- 孙涛, 雷晶超, 刘阳, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘镇原地区洛河组 沉积环境对铀成矿的制约[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 199-217.
- SUN Tao, LEI Jingchao, LIU Yang, et al. The Constraints of the Depositional Environment of the Luohe Formation on Uranium Mineralization in the Zhenyuan Area of the Southwestern Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 199–217.
- 田刚,杨明慧,宋立军,等.鄂尔多斯盆地基底结构特征及演化 过程新认识[J].地球科学,2024,49(1):123-139.

- TIAN Gang, YANG Minghui, SONG Lijun, et al. New understanding of basement structural characteristics and its evolution process in Ordos Basin[J]. Earth Science, 2024, 49(1): 123–139.
- 王贵玲,刘志明,蔺文静.鄂尔多斯周缘地质构造对地热资源形成的控制作用[J].地质学报,2004,78(1):44-51.
- WANG Guiling, LIU Zhiming, LIN Wenjing. Tectonic control of geothermal resources in the peripheral of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 44–51.
- 魏国齐,朱秋影,杨威,等.鄂尔多斯盆地寒武纪断裂特征及其 对沉积储集层的控制[J].石油勘探与开发,2019,46(5): 836-847.
- WEI Guoqi, ZHU Qiuying, YANG Wei, et al. Cambrian faults and their control on the sedimentation and reservoirs in the Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 836–847.
- 吴乾蕃,祖金华,廉雨方,等.山西断陷带地热特征与地震活动 性[J].华北地震科学,1993,2:14-22.
- WU Qianfan, ZU Jinhua, LIAN Yufang, et al. The geothermal field characteristics and seismic activities in Shanxi fault depression area[J]. North China Earthquake Sciences, 1993, 2: 14–22.
- 汪集旸,邱楠生,胡圣标,等.中国油田地热研究的进展和发展 趋势[J].地学前缘,2017,24(3):1-12.
- 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): 1–12.
- 仵阳,赵福元,虎新军,等.银川盆地东缘上地壳电性结构特征 及地热勘探方向[J].物探与化探,2024,48(5):1258-1267.
- WU Yang, ZHAO Fuyuan, HU Xinjun, et al. Electrical structure characteristics and geothermal exploration directions of the upper crust on the eastern margin of the Yinchuan Basin[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2024, 48(5): 1258–1267.
- 熊盛青,杨海,丁燕云,等.中国陆域居里等温面深度特征[J]. 地球物理学报,2016,59(10):3604-3617.
- XIONG Shengqing, YANG Hai, DING Yanyun, et al. Characteristics of Chinese continent Curie point isotherm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10); 3604–3617.
- 徐柳娜,李春峰,黄亮,等.红海与加利福尼亚湾初始扩张系统的热状态差异[J].热带海洋学报,2023,42(6):74-88.
- XU Liuna, LI Chunfeng, HUANG Liang, et al. Contrasting thermal states of the initial spreading systems between the Red Sea and the Gulf of California[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2023, 42(6): 74–88.
- 许光,李玉宏,王宗起,等.我国氦气资源调查评价进展[J].地 质学报,2023,97(5):1711-1716.
- XU Guang, LI Yuhong, WANG Zongqi, et al. Progress of investigation and evaluation of helium resources in China[J]. Acta Geo-

logica Sinica, 2023, 97(5): 1711-1716.

- 杨华,张军,王飞雁,等.鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征[J]. 天然气工业,2000,20(6):7-11.
- YANG Hua, ZHANG Jun, WANG Feiyan, et al. Characteristics of the Paleozoic gas bearing system in the Ordos Basin[J]. Nature Gas Industry, 2000, 20(6): 7–11.
- 张健,何雨蓓,范艳霞.松辽盆地地壳热结构与深部热源条件[J].地球科学与环境学报,2023,45(2):157-167.
- ZHANG Jian, HE Yubei, FAN Yanxia. Crustal thermal structure and deep heat source conditions in Songliao Basin, NE China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 157– 167.
- Andrés J, Marzán I, Ayarza P, et al. Curie point depth of the Iberian Peninsula and surrounding margins. A thermal and tectonic perspective of its evolution[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123: 2049–2068.
- Awoyemi M O, Falade S G, Arogundade A B, et al. Magnetically inferred regional heat flow and geological structures in parts of Chad Basin, Nigeria and their implications for geothermal and hydrocarbon prospects[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 213: 110388.
- Blakely R J. Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1988, 93: 11817–11832.
- Gao G, Kang G, Li G, et al. Crustal magnetic anomaly in the Ordos region and its tectonic[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 109: 63–73.
- Gao G, Lu Q, Wang J, et al. Constraining crustal thickness and lithospheric thermal state beneath the northeastern Tibetan Plateau

and adjacent regions from gravity, aeromagnetic, and heat flow data[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2021, 212: 104743.

- Herrera D R H, Castro D L, Oliveira J T C, et al. Crustal thermal structure of the Brazilian equatorial margin using Fourier and continuous wavelet transforms: A comparative analysis based on different magnetic datasets[J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43: 883–912.
- Li C, Shi X, Zhou Z, et al. Depths to the magnetic layer bottom in the South China Sea area and their tectonic implications[J]. Geophysical Journal International, 2010, 182(3): 1229–1247.
- Li C, Wang J. Thermal structures of the Pacific lithosphere from magnetic anomaly inversion[J]. Earth and Planetary Physics, 2018, 2: 1–15.
- Li C., Wang J. Variations in Moho and Curie depths and heat flow in eastern and southeastern Asia[J]. Marine Geophysical Research, 2016, 37(1): 1–20.
- Saada S A. Curie point depth and heat flow from spectral analysis of aeromagnetic data over the northern part of Western Desert, Egypt[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 134: 100–111.
- Spector A, Grant F S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[J]. Geophysics, 1970, 35: 293–302.
- Stüwe K. Geodynamic of the Lithosphere[M]. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- Turcotte D L, Schubert G. Geodynamics[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- Xu Y., Hao T, Zeyen H, et al. Curie point depths in North China Craton based on spectral analysis of magnetic anomalies[J].Pure and Applied Geophysics, 2017, 174: 339–347.