第 56 卷 第 5 期 2023 年(总 231 期)

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 56 No. 5 2023(Sum231)

DOI: 10.12401/j.nwg.2023070

鄂尔多斯盆地东南部重磁场特征及其氦气勘探意义

魏泽坤^{1,2},冯旭亮^{1,2,3,*},马佳月^{1,2},杨柳^{1,2},吴传波^{1,2},刘凯轩^{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. 海洋油气勘探国家工程研究中心,北京 100028)

摘 要:氦气作为一种稀有气体,广泛应用于国防军工、高新技术产业发展等领域,关系到国家的安全与发展。中国氦气资源短缺,对外依赖程度高。鄂尔多斯盆地内展现出了较好的氦气资源前景,但对与氦气分布密切相关的氦源岩及断裂特征研究较少,制约了对盆地氦气资源潜力的认识。笔者利用归一化总水平导数垂向导数(NVDR-THDR)、垂向导数、位场分离等技术对鄂尔多斯盆地东南部的重磁资料进行处理,推断主要断裂和潜在的氦源岩(强磁性变质岩)。鄂尔多斯盆地东南部氦气分布受基底断裂与氦源岩分布的双重控制,基底强磁性变质岩为盆地内部的氦气富集提供气源条件,断裂活动则为氦气运移提供通道。富县-宜川-黄龙一带分布有大量的强磁性变质岩,大多位于断裂附近及其交汇区域,可能是氦气资源潜在有利区。 关键词:氦气资源;重磁异常;变质岩;断裂;鄂尔多斯盆地

中图分类号: P631.1; P631.2 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2023)05-0098-13

Characteristics of Gravity and Magnetic Field and their Significance of Helium Resources Exploration in the Southeastern Ordos Basin

WEI Zekun^{1,2}, FENG Xuliang^{1,2,3,*}, MA Jiayue^{1,2}, YANG Liu^{1,2}, WU Chuanbo^{1,2}, LIU Kaixuan^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;
 National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100028, China)

Abstract: Helium is widely used in the fields of national defense, military industry, high-tech industry development and so on, as a rare gas related to the national security and development. China is short of helium resources and highly dependent on foreign countries. There is a good prospect of helium resources in Ordos basin. However, there are fewer study on the characteristics of the helium source rocks and the faults related closely to the helium distribution, which limits the evaluation of the helium resource potential in the basin. In this thesis, the gravity and magnetic data in the southeast of Ordos basin are processed by using the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative (NVDR-THDR), vertical derivative and potential field date separation techniques, and inferred the main faults and potential helium source rocks (strong magnetic metamorphic

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-04-17; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目:西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划资助(YCS21213184)资助。

作者简介:魏泽坤(1997-),男,硕士研究生,从事重磁勘探及地球物理综合解释。E-mail:wzk15513253029@163.com。

^{*}通讯作者: 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解释研究。 E-mail: fxlchd@163.com。

rocks). The distribution of helium resources is controlled by the basement faults and the distribution of helium source rocks. The strong magnetic metamorphic rocks provide gas source conditions for helium enrichment in the basin, and fault activity provides channels for helium migration. There are a large number of metamorphic rocks distributed in Fuxian-Yichuan-Huanglong area. Most of them are located near faults and their intersection areas, which may be potential favorable areas for helium resources.

Keywords: helium resources; gravity and magnetic anomaly; metamorphic rock; faults; Ordos basin

氦气是国防军工和高科技产业发展不可或缺的 稀有战略性物资之一(李玉宏等, 2022),在航天、国防 和高端能源系统,半导体和光纤制造等工业领域,医 学成像与深潜水等民生领域应用广泛(贾凌霄,2022)。 地球上氦气资源极为有限且分布极不均匀。美国地 质调查局 2021 年报告显示,全球氦气总资源量约为 484× 10⁸ m³, 主要分布在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗 斯等4国(张宇轩等,2022),其资源量总和占全球总 量的87%。自20世纪80年代以来,全球氦气资源长 期短缺,中国氦气年需求量近3000万m³,但其产量不 足100万m³,长期依赖进口。目前,国内已发现的氦 气资源主要集中在中-西部盆地和东部郯庐断裂带两 侧含油气盆地。中-西部主要发现于四川盆地、塔里 木盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地及南部渭河盆地 (李玉宏等, 2016; 陶小晚等, 2019; Wang et al., 2020; 晁 海德等, 2022; 贺政阳等, 2022; 赵安坤等, 2022; 周俊 林等,2022;)。此外,东北地区的松辽、海拉尔、辽河、 铁法等盆地发现了具有工业价值的氦气资源,晋中的 临汾-运城盆地、江西省的温泉中也发现了氦气资源 (邹勇军等, 2022; 司庆红等, 2023; 张健等, 2023)。

氦在自然界中有^³He 和^⁴He 两种稳定的同位素(徐 永昌,1997),其来源主要有3个:大气源、壳源(放射 性来源)和幔源,其中大气中的氦含量极少,且提取难 度极大,故可忽略不计。中国东部含氦盆地中的氦气 来源以壳幔混合为主,而中西部地区的氦气为壳源成 因,在20世纪70年代,渭河盆地的天然气井中发现有 良好的富氦天然气显示,氦气为壳源成因,氦源岩为 盆地内分布的多期富Th、U的花岗岩(李玉宏等, 2011)。目前,中国对氦气资源的研究程度较低,资源 量认识也不够清晰,仅在四川威远气田开展过工业制 氦,因其开发时间较长,天然气资源几乎枯竭(刘凯旋 等, 2022), 寻找新的富 He 天然气藏刻不容缓。近年 来,随着对鄂尔多斯盆地油气勘探开发的进一步深入, 在盆地东缘石西区块中的煤层气与砂岩气中均发现 有氦气显示(刘超等, 2021), 多为 0.05%~0.15%, 为 含 He 天然气;盆地北部东胜气田天然气中氦气含量 为 0.045%~0.487%, 达到含 He-富 He 气田标准, 且氦 气来源于太古宇—元古宇变质岩-花岗岩系衰变产生 (何发岐等, 2022), 且普遍认为鄂尔多斯盆地氦气为 典型的壳源氦特征(戴金星等,2005;孙晓等,2021)。 盆地边部石西区块与东胜气田含 He 天然气的发现, 表明该盆地在一定的地质条件下会形成富 He 天然气, 为该盆地氦气资源的进一步调查提供依据。但盆地 内所开展的天然气中氦气的相关研究较少,对于氦气 分布规律认识并不充分。

盆地断裂体系及基底岩性研究对于认识氦气分 布规律具有关键作用。关于鄂尔多斯盆地及周缘的 基底结构与断裂特征前人已做了一定的研究(周正, 2009; 李明等, 2010; 何紫娟, 2013; 许文强等, 2015; 包 洪平等, 2019; 李冰等, 2019;), 但上述研究大多是针 对整个盆地或是盆地南缘展开的,缺乏对盆地东南部 构造特征系统的研究。此外,目前对于鄂尔多斯盆地 东南缘基底岩性也鲜有研究(李明等, 2012)。区域性 重磁资料具有经济、覆盖面积广、横向分辨率高等优 势,已广泛应用于盆地构造研究,以重磁技术为主的 地球物理方法在氦气资源分布规律研究方面也取得 了一定的成果(路利春等, 2017; 张春灌等, 2017; Feng et al., 2022)。笔者以重磁资料为主, 推断鄂尔多斯盆 地东南部的断裂构造及潜在的氦源岩,为研究氦气分 布规律提供重要的地球物理资料支撑。

地质概况 1

鄂尔多斯盆地位于华北地块西部,是一个古生代 稳定沉降、中生代坳陷东移、新生代多断陷的多旋回 克拉通盆地(杨华等, 2014; 黄志刚等, 2016; 吴浩等, 2017;魏柳斌等, 2021),盆地演化发展受到华北板块 演变的直接影响。盆地基底主要由新太古界(Ar₃)— 古元古界(Pt₁)结晶变质岩系组成,岩石组成极为复杂, 大多经历了较强的区域变质作用,属于变质程度较深 的区域变质岩系,主要是各种片岩、片麻岩、变粒岩、 混合岩、大理岩及花岗片麻岩等(包洪平等,2019),盆 地基底形态为东高西低,北高南低,呈不对称状(密文 天等,2016)。盆地盖层发育的地层包括中生界的三 叠系(T)、侏罗系(J)、下白垩统(K₁)和新生界的古近 系(E)、新近系(N)及第四系(Q)等(何紫娟,2013;汤 超,2014),各个地层在不同区域横向与纵向上分布差 别比较大,主要地层为三叠系、侏罗系和白垩系。

研究区位于鄂尔多斯盆地的东南部(图1),处于 伊陕斜坡和渭北隆起的过渡部位,其东北区域为晋西 挠褶带的一部分,盆地的基底岩性在磁性上存在着较 大差异,是由不同岩性的岩石所组成,在其分界处可 能存在有大型基底断裂,其方向主要以 NE 向为主,研 究区内主要断裂的方向与盆地内部断裂的方向大致 相同。伊陕斜坡东南部构造简单,断裂发育也较少 (孙建博等, 2018); 而渭北隆起的构造相对较为复杂, 为中生代以来形成的断块隆起(任战利等, 2014),断 裂则较为发育,由于鄂尔多斯盆地与秦岭造山带长期 相互作用,导致中新生代沉积盖层发生了较为强烈的 构造变形,从北到南构造规模由小到大,构造变形由 弱到强。鄂尔多斯地块周缘有广泛的岩浆岩出露,且 从太古宇到白垩纪均有分布。鄂尔多斯盆地北缘有 古元古代2期以及早石炭世末期—二叠纪、早—中侏 罗世、早白垩世共5期岩浆活动;南缘有新元古代、古



图 1 研究区位置示意图 Fig. 1 Location of study area

生代、早中生代和晚中生代 4 期岩浆活动;东缘则以 发育中生代以来的岩浆活动为主。此外,盆地内部还 发育多个已被证实的隐伏岩浆岩体,包括龙门岩体、 吴忠岩体和乌海东岩体等(何登发等,2021)。

2 地球物理特征

2.1 岩石物性特征

综合分析和总结研究区岩石、地层密度特征是进 行重力异常处理与解释的前提和重要依据(孟军海等, 2021)。笔者通过收集前人在研究区及邻区的物性研 究成果,分析总结研究区岩石、地层密度特征(李冰等, 2019; 宁媛丽等, 2020)(表1)。研究区内除缺失泥盆 系、志留系以外,前寒武系至第四系均有不同程度的 出露,区内多发育三叠系、侏罗系、白垩系,只有在研 究区南部出露少量二叠系—石炭系、奥陶系—寒武系。 区内地层密度随时代变老而逐渐增大,新生界岩性以 红色、黄色的黏土、黄土为主,表现为低密度特征,密 度值为 1.87~2.38 g/cm3; 中生界岩性主要以砂岩、泥 岩、页岩为主,表现出中等密度特征,密度值为 2.40~2.55 g/cm³; 古生界以白云岩、石英岩、灰岩为主, 表现出中高密度特征,密度值为 2.60~2.70 g/cm3;前 寒武系密度值大于 2.70 g/cm3。盆地内部暂未发现岩 浆岩露头,盆地周缘的闪长岩、花岗岩、玄武岩、二长 岩等侵入岩的密度值为 2.56~2.69 g/cm3, 表现为中高 密度特征。

鄂尔多斯盆地沉积岩几乎无磁性,磁异常主要来 自结晶基底的变质岩系和侵入岩。统计数据显示 (表1),研究区内地层分为弱-无磁性层、磁性层。新 生界—元古界的磁化率为7.8×10⁻⁵~56×10⁻⁵ SI,呈弱 磁性或无磁性特征。太古界片麻岩、变粒岩等变质岩 的磁化率值一般为780×10⁻⁵~5600×10⁻⁵ SI,分布比较 广泛,为区域磁性层。除此之外,盆地周缘分布有多 种侵入岩,如闪长岩、花岗岩、玄武岩和二长石等,其 磁化率一般为700×10⁻⁵~5400×10⁻⁵ SI,是引起盆地周 缘地区高磁异常的主要原因。

2.2 重力场特征

研究区布格重力异常(图 2)资料的比例尺为 1:50万,异常整体呈现北西低、南东高的特征,与研 究区构造特征相吻合。研究区东南部大荔及其北东 区域,重力异常呈 NEE 向高低相间的条带,为渭河盆 地的一部分,其重力异常梯级带可能是渭河盆地北缘

rao. 1 The perophysical property in Ordos basin					
地层/岩体		岩石密度ρ(g/cm ³)		磁化率(10 ⁻⁵ SI)	
		密度值	平均值	密度值	平均值
新生界	第四系	1.63~2.10	1.87	36~79	56
	古近系 新近系	2.30~2.39	2.38	5~13	9.6
	白垩系	2.41~2.44	2.40	10.5~58.9	18.6
中生界	侏罗系		2.43	6.5~17.3	10.5
	三叠系		2.55	8.8~18.6	15.3
	二叠系		2.60	2.5~22.0	16.3
十十日	石炭系			3.2~20.8	9.6
百生齐	奧陶系		2.70	5.6~14.6	8.8
	寒武系			10.5~16.8	12.7
元古界			2.70	5.4~9.2	7.8
	变粒岩		2.76	$1300{\sim}10600$	5 600
十十日	片麻岩			8.6~1400	780
人 百 齐	混合岩			10.5~16.8	13.6
	大理岩			11.6~245	18.4
	闪长岩	2.5~3.3		40~9545	5 332
	花岗闪长岩	2.56	2.56		1 374.18
侵入岩	花岗岩		2.58	$0 \sim 6048$	3 206
	玄武岩	2.8~3.3	2.69	$10 \sim 2713$	1 250
	二长石	2.47~2.71	2.59		771.16



Tab. 1 The petrophysical property in Ordos basin



图 2 布格重力异常图 Fig. 2 Bouguer gravity anomaly

断裂的反映,反映了该盆地呈隆坳相间的特征。研究 区中南部铜川-合阳-黄龙一带,重力异常主要呈 NE 向高值条带,该区为渭北隆起区,其为中生代以来形成的断块隆起,寒武系等老地层出露,中生界等地层较薄,是引起高重力异常的主要原因。研究区北西部安塞至延安一带,呈区域性重力低,局部异常多呈NE向、近NS向展布。该区为伊陕斜坡的一部分,地层以较厚的中生界为主,是重力异常呈现平缓低重力特征的主要原因。研究区中部偏北西的富县--宜川-大宁一带,以平缓的中低重力异常为主,富县--延川存在局部NNE向中高重力异常,可能反映了伊陕斜坡内基底存在局部的凸起,在低重异常与高重力异常过渡区域可能存在有断裂。

2.3 磁力场特征

研究区化极磁力异常资料(图 3)由1:5万~ 1:20万不等比例尺的磁测资料拼合而成,整体呈现 为"两高夹一低"的形态。研究区东南部合阳一带 表现为高磁异常,整体磁力异常值为200~600 nT,呈 NE向带状展布,推测该高磁异常主要由基底强磁性 变质岩如片麻岩、变粒岩引起,在合阳东南侧存在着 NE向的磁力异常梯级带,可能为基底断裂的反映。 盆地中部以铜川-黄龙-宜川-大宁和富县-延川为界, 中部区域表现为整体的磁力低,推测主要由基底弱磁 性变质岩如大理岩、混合岩等引起。在黄龙、宜川等 地存在局部高磁异常,可能由盆地基底之中强磁性变 质岩引起的,延安至延川西北区域表现为中高磁力异 常,磁力异常值为 0~200 nT。鄂尔多斯盆地的沉积 盖层磁性一般较弱,只有结晶基底中片麻岩、变粒岩 等属于强磁性岩体,因此大范围的高磁异常是强磁性 结晶基底的反映。基底岩性的不同造成了区域性磁 力异常的不同,化极磁力异常规模较大的梯级带可能 为基底大断裂的反映,其也为基底岩性的分界线。



图 3 化极磁力异常图 Fig. 3 Magnetic anomaly reduced to the pole

3 断裂构造特征

断裂活动破坏原有地质体的连续性,造成物性 (密度、磁性)上的横向差异,使得断裂两侧呈现明显 的重力和磁力异常。归一化总水平导数垂向导数 (NVDR-THDR)边缘识别技术(Wang et al., 2009)是 一种有效的识别断裂的方法,通过极大值连线位置或 极大值错断位置确定断裂构造特征线,已广泛应用于 断裂识别之中(王万银等, 2014;纪晓琳等, 2019;马涛 等, 2020;王学发等, 2020)。研究区存在3个级别的断 裂,其中一级断裂为盆地基底岩性的区域性分界线, 二级断裂主要为基底断裂,控制了基底的隆坳格局, 三级断裂则为沉积盖层内部断裂。由表1可知,鄂尔 多斯盆地基底岩性在磁性上存在较大差异,密度差异 很小,因此以化极磁力异常为主进行一级断裂的划分, 重磁异常相结合对二级断裂进行划分,三级断裂则利 用重力异常进行划分。

为了进一步说明断裂识别方法的可靠性,在研究 区的中南部沿一条地震剖面(魏国齐等,2019)A-A' (位置如图 3)提取化极磁力异常、化极磁力异常 NVDR-THDR 及化极磁力异常、化极磁力异常 析,结果如图 4 所示。结果表明,化极磁力异常在此 剖面上自 NW向 SE 呈减小趋势,且在断裂位置处的 明显减小(图 4b);化极磁力异常 NVDR-THDR 剖面 的极大值处与地震剖面断裂相叠合(图 4c),这与该技 术的断裂识别标志相吻合;在化极磁力异常垂向一阶 导数剖面中,断裂与高低异常值的分界处及0值线处 相叠合(图 4d)是断裂在化极磁力异常垂向一阶导数 中较好的反映。综上所述,利用该方法结合地质资料 可以有效识别出研究区的断裂构造特征。

笔者以重磁异常 NVDR-THDR 为主,结合其他 异常,最终在研究区推断出了一级断裂3条、二级断 裂8条以及三级断裂51条(图5a)。断裂的主要走向 为NE向和近NEE向,其次是NW向和近EW向。

3.1 一级断裂

研究区内共推断一级断裂3条,断裂长度均在 200 km以上,该类断裂主要为基底不同岩性的分界线。 断裂两侧重磁异常特征明显,表现为大型线性异常带、 梯级带或不同重磁异常的分界线,异常连续性好且延 伸较长。

(1)F1-1(延安-延川断裂):该断裂位于延安-延 川一带,断裂总长为218.8 km,呈 NE 走向,断裂两侧 多出露新近系—第四系、侏罗系,少量出露三叠系、 白垩系。该断裂两侧化极磁力异常特征明显不同 (图 5b),断裂北西侧为区域性高磁异常,而其南东侧 以大范围平缓低磁异常为主,表明该断裂可能为不同 岩性基底的分界线,可能反映了鄂尔多斯盆地基底早 期的拼合特征。在化极磁力异常 NVDR-THDR 图上 (图 5c)表现为一系列 NE、NEE 向的极大值条带,可 能反映了断裂附近构造活动较为强烈。在化极磁力 异常垂向一阶导数图上(图 5d),断裂处于高低异常值 的分界线上,在断裂的上半部分与下半部分表现尤为 明显。该断裂在重力异常图上也有较明显的反映,在 布格重力异常(图 6a)上,断裂两侧异常特征不同,北





西侧以低重力异常为主,而南东侧以中高重力异常为 主。在布格重力异常 NVDR-THDR 图上(图 6b),由 几个 NE 向极大值条带组成,异常特征较为明显。由 此可见,该断裂也控制了基底之上沉积层的展布,使 得断裂两侧呈现出了不同的重力异常特征。

(2)F1-2(渭北隆起北缘断裂):该断裂为渭北隆 起北界,长约为342.7 km,呈 NNE向展布。断裂两侧 主要出露三叠纪、侏罗纪,并见少量新近系。断裂两 侧表现为截然不同的化极磁力异常特征(图5b),其北 西侧为大范围平缓低磁异常为主,而断裂的南东侧则 是以 NE 向的大型高磁异常带为主,表明断裂可能为 不同岩性基底的分界线,其两侧表现为不同的区域构 造格局。在化极磁力异常 NVDR-THDR 图上(图5c) 表现为一系列 NE、NEE 向的极大值条带,该断裂为逆 断层,规模较大,构造活动性强,是渭北隆起与陕北斜 坡的边界断裂(许文强等,2015)。在化极磁力异常垂 向一阶导数图中(图 5d),断裂处于高低异常值的分界 处与0值线上,有较好的断裂构造显示。该断重力异 常图上也有较为明显的反映,在布格重力异常(图 6a) 上,断裂的南段处于高重力异常区上,断裂北段两侧 则表现为不同的重力异常特征。在布格重力异常 NVDR-THDR 图上(图 6b),断裂的南段没有明显 的异常特征,断裂北段由几个 NNE 向的极大值条带 组成。

(3)F1-3(渭河盆地北缘断裂):断裂位于渭北隆 起的南缘,为渭北隆起与渭河盆的边界断裂,总长约 为224 km,呈 NE向分布。断裂两侧主要出露的地层 为侏罗系和二叠系,整体处于高磁异常带上(图 5b), 其两侧均表现为区域性高磁异常特征,大荔及其研究 区东南部则为局部低磁异常,该断裂为北升南降的高 角度正断层,构造活动复杂,规模大,活动期长,近 期仍有活动(许文强等,2015)。在化极磁力异常



a. 推断断裂平面分布图; b. 断裂与化极磁力异常图; c. 断裂与化极磁力异常 NVDR-THDR 图; d. 断裂与化极磁力异常垂向一阶导数图

图 5 推断断裂分布与磁力异常图



NVDR-THDR 图中(图 5c),断裂处于极大值连线上, 与极大值对应较好。在化极磁力异常垂向一阶导数 图中没有明显的表现。该断裂在重力异常图上也有 一定的反映,在布格重力异常(图 6a)上,断裂的北段 处于高重力异常上,中部则处于局部低重力异常 区,南段处于重力异常梯级带上,在布格重力异常 NVDR-THDR 图中(图 6b),由几个 NE 向极大值条带 组成,异常特征较为明显,可能反映了断裂附近构造 活动较为强烈,小规模断裂较为发育。

3.2 二级断裂

研究区内共推断二级断裂8条,断裂长度为100~

275 km,该类断裂重磁异常特征较为明显,具有一定 规模的线性异常带、梯级带、串珠异常带等,在化极 磁力异常 NVDR-THDR 图上表现为极大值连续性 较好。

(1)NW向断裂系(F2-1~F2-4): 在整个研究区内 部,除了发育北东向的大型盆地基底断裂,还发育了 一些NW、NWW向的二级断裂,长度为160~230 km。 处于具有一定规模的化极磁力异常线性带、梯级带上 (图 5b),断裂系的北西部分处于高磁异常区,中部则 处于区域性低磁异常区,南东部分处于高磁异常带上, 表明该断裂的形成时间明显晚于 NE 向构造,对后者



a. 断裂与布格重力异常图; b. 断裂与布格重力异常 NVDR-THDR 图
 图 6 推断断裂分布与重力异常图
 Fig. 6 The distribution of inferred faults and gravity anomalies

起到切割和错断作用,使得研究区中部,整体分段向 左滑动。在化极磁力异常 NVDR-THDR 图上(图 5c), 断裂系处于极大值条带上或极大值的错断处。在化 极磁力异常垂向一阶导数图及重力异常图上则没有 明显的反映。

(2)NE向断裂系(F2-5~F2-8):研究区发育了一 些 NE 向的二级断裂, 断裂长度为 100~275 km, 大致 呈等间距排列,断裂方向与一级断裂方向大致相同, 形成时间早于 NW 向断裂系, 被切割错断, 导致 NW 向断裂系向左滑动。在化极磁力异常图上(图 5b), F2-5、F2-8处于磁力异常高值区,F2-6则处于磁力异常梯 级带上, F2-7处于局部高磁异常上。在化极磁力异常 NVDR-THDR 图上(图 5c)也有一定的反映,断裂处 于极大值或极大值错断处。在化极磁力异常垂向一 阶导数图中(图 5d), F2-6 处于 0 值线处, 是断裂构造 的标志。在布格重力异常(图 6a)上, F2-5、F2-7、F2-8 处于重力异常梯级带上, F2-6则处于重力异常高值带 上;在布格重力异常 NVDR-THDR 图中(图 6b),极大 值与断裂对应较好,表明该断裂系在一定程度上控制 着研究区沉积层的分布,使得断裂两侧表现为不同的 重力异常特征。

3.3 三级断裂

除一级、二级断裂外,盆地发育了大量的三级断裂,共计51条,其断裂方向以NE、NW向为主,分布 于整个研究区。三级断裂主要为沉积层内部断裂,与 磁力异常的关系不明显,主要利用布格重力异常与布 格重力异常NVDR-THDR进行划分,表现为布格重力异常局部错断位置、重力异常梯级带或NVDR-THDR的极大值或局部错断位置(图 6a、图 6b)。该类断裂规模小,数量多,可能为氦气运移的通道。

4 氦源岩分布特征

国内研究较多的含 He 盆地(如渭河盆地)的勘探 实践表明,地球物理是研究盆地氦气资源分布规律的 有效方法,其中磁力资料能在很大程度上反映氦源岩 的分布特征。例如,渭河盆地内部高氦气含量井在空 间分布上往往与高磁异常有关(李玉宏等, 2011;张春 灌等,2017)。鄂尔多斯盆地氦气相关研究成果表明 盆地氦气为壳源成因,其成因为壳内岩体放射性衰变。 花岗岩被认为是渭河盆地和四川威远气藏的主要氦 源,花岗岩中U、Th元素放射性衰变形成氦气;变质 岩中U、Th元素含量也较高(陈道公等, 2004),也可 作为氦源岩,其在东胜气田得到了证实(何发岐等, 2022)。因此,如何识别盆地内部强磁性变质岩是氦 气资源远景调查的关键之一。笔者根据化极磁力异 常垂向一阶导数、剩余化极磁力异常与划分的一级、 二级断裂,并结合地质资料进行分析,将研究区划分 为西北部、中部及东南部3个大区,并识别出有效的 氦源岩。

从图 3显示,3个大区的化极磁力异常存在明显的差异,引起该异常变化的原因可能有 2种:①磁性

结晶基底的起伏所引起的差异。②不同岩性的磁性 结晶基底引起磁力异常变化。为了明确引起异常变 化的原因,在研究区沿一条近 SN 向的剖面 B-B'(徐 兴雨,2020)(图 3),进行磁力剖面拟合,通过修改模型 参数,当拟合的正演曲线与实测曲线差异最小时,认 为拟合效果达到了最优。

图 7 为 B-B'剖面拟合结果, 剖面位于研究区的 西部, 长约为 184 km。不同磁性基底所构成的基底模 型共分为 9 个, 拟合时假设沉积层无磁性。由拟合结 果可知(图 7b), 结晶基底由北到南逐渐升高, 其两侧 的磁化强度远高于中部, 拟合曲线与实测曲线差异较 小, 故比较符合地质构造特征。同一磁性的结晶基底 的磁化率磁化强度不变, 磁化强度设置为 0.04 A/m, 模 型不变, 正演出的曲线与实测曲线相差较大(图 7c), 不符合该地质特征。综上所述, 结晶基底磁性差异是 引起区域性磁力异常不同的主要原因。

西北与东南区域分别以F1-1、F1-2断裂为边界, 西北部以大范围的中高磁力异常为主,东南区域也 分布有大型 NE 向高磁异常带(图 8a)。盆地基底岩 石中大量的片麻岩、变粒岩等强磁性岩体,是引起 区域性高磁异常的主要原因,这些区域内可能存在 大规模的强磁性变质岩等氦源岩,具有较好的气源 条件。研究区中部 F1-1、F1-2 断裂之间的区域,为 区域性低磁异常区(图 8a),反映了基底岩性整体以 混合岩、大理岩等弱磁性岩体为主,局部等轴状、椭 圆状高磁异常可能为局部分布的片麻岩等强磁性变 质岩的反映(如 G1~G21)(图 8b)。剩余化极磁力 异常(图 8b)中,局部高磁异常 G1~G21 主要集中在 富县--宜川-黄龙一带,在西南缘及东北缘也有分布, 其可能为基底强磁性变质岩的反映,为潜在的氦 源岩。

氦源岩与断裂分布也存在一定的联系,如 G1~G3岩体分布于研究区的东北缘,岩体面积为 60~140 km²,处于F1-2、F2-1、F2-6断裂的交汇区域; G4分布F2-6断裂的右侧,岩体面积为310 km²,岩体 规模较大,富县-宜川-黄龙一带的G5~G16岩体亦处 于断裂交汇区域,大面积分布的氦源岩使得该地区有 着较好的氦气资源潜力。



图 7 磁力剖面拟合图(图中数值为磁化强度)

Fig. 7 Magnetic profile fitting(The value in the figure is the magnetization intensity)



a. 化极磁力异常垂向一阶导数图; b. 剩余化极磁力异常图

图 8 化极磁力异常垂向一阶导数图与剩余化极磁力异常图



5 结论

(1)以 NVDR-THDR 位场边缘识别技术为主对 该地区的断裂进行划分,推断出一级断裂 3 条、二级 断裂 8 条和三级断裂 51 条,其中一级断裂为盆地基底 岩性的区域性分界线,呈 NE 向分布,横穿整个研究区, 可能反映鄂尔多斯盆地基底早期的拼合特征。二级 断裂为基底断裂,呈 NE 向、NW 向展布,其中 NW 向 断裂形成时间晚于 NE 向断裂,控制基底的隆坳格局。 三级断裂多为沉积层内部断裂,规模小,数量多,可能 为氦气运移的通道。

(2)利用化极磁力异常垂向一阶导数、剩余化极 异常并结合区域地质资料对氦源岩的分布进行研究, 研究区西北、东南部大面积的高磁异常反映该区基底 岩性可能以大规模的强磁性变质岩为主,具有较为充 足的氦源条件;中部延川-富县-黄龙-宜川一带基底 岩性整体以弱磁性大理岩、混合岩等为主,局部高磁 异常为强磁性变质岩的反映,其也为潜在的氦源岩。

(3)研究区断裂为氦气运移提供了通道,氦源岩 与断裂的关系表明,大规模的氦源岩多分布于断裂附 近及断裂的交汇部位,形成了研究区氦气资源分布及 富集的地质-地球物理背景。

参考文献(References):

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(01): 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(01): 33–43.
- 陈道公, 倪涛. 大别-苏鲁造山带高级变质岩中锆石微区 U, Th 和 Pb 化学组成特征统计[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 8.
- CHEN Daogong, NI Tao. Zircon U, Th and Pb Characteristics of High-Grade Metamorphic Rocks from Dabie-Sulu Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(5); 8.
- 晁海德,陈建洲,王国仓,等.柴达木盆地水溶氦气资源的发现 及富集机理[J].西北地质,2022,55(4):61-73.
- CHAO Haide, CHEN Jianzhou, WANG Guocang, et al. Discovery and Enrichment Mechanism of Water Soluble Helium Resources in Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 61–73.
- 戴金星,李剑,侯路.鄂尔多斯盆地氦同位素的特征[J].高校地 质学报,2005,11(04):473-478.
- DAI Jinxing, LI Jian, HOU Lu. Characteristics of Helium Isotopes in the Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(04): 473–478.
- 何登发,包洪平,开百泽,等.鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造 变 革 期 次 及 其 特 征 [J].石 油 学 报,2021,42(10): 1255-1269.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Critical Tectonic Modification Periodls and its Geologic Features of Ordos Basin and Adjacent Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(10): 1255–1269.
- 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):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); 10.
- 何紫娟.重磁综合处理解释在鄂尔多斯区域构造中的应用研究 [D].北京:中国地质大学,2013.
- HE Zijuan. The Application of Gravity and Magnetic Data Processing and Interpretation in Regional Tectonic Analysis of Ordos Basin. [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- 贺政阳,杨国军,周俊林,等.柴达木盆地北缘天然气中氦气富 集规律与远景区预测[J].西北地质,2022,55(4):45-60.
- HE Zhengyang, YANG Guojun, ZHOU Junlin, et al. Helium Enrichment Law and Predication of Prospective Areas of the North Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 45–60.
- 黄志刚,任战利,高龙刚.鄂尔多斯盆地东南缘白垩纪以来构造 演化的裂变径迹证据[J].地球物理学报,2016,59(10): 3753-3764.
- HUANG Zhigang, REN Zhanli, GAO Longgang. Evidence from Detrital Zircon and Apatite Fission Track for Tectonic Evolution since Cretaceous in Southeastern Margin of Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geophys, 2016, 59(10): 3753–3764.
- 纪晓琳, 王万银, 杜向东, 等. 利用重磁资料研究西非中南段含 盐 盆 地 构 造 区 划[J]. 地 球 物 理 学 报, 2019, 62(04): 1502-1514.
- JI Xiaolin, WANG Wanyin, DU Xiangdong, et al. Tectonic Division by Gravity and Magnetic Anomaly Data of Salt-bearing Basins, South-Central Section of West Africa[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(04): 1502–1514.
- 贾凌霄,马冰,王欢,等.全球氦气勘探开发进展与利用现状[J]. 中国地质,2022,49(05):1427-1437.
- JIA Lingxiao, MA Bing, WANG Huan, et al. Progress and Utilization Status of Global Helium Exploration and Development[J]. Geology in China, 2022, 49(05): 1427–1437.
- 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 and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 767–777.
- 李明,高建荣.鄂尔多斯盆地基底断裂与火山岩的分布[J].中 国科学:地球科学,2010,40(08):1005-1013.
- LI Ming, GAO Jianrong. Basement Faults and Volcanic Rock Distributions in the Ordos Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 40(08): 1005–1013.
- 李明, 闫磊, 韩绍阳. 鄂尔多斯盆地基底构造特征[J]. 吉林大学 学报 (地球科学版), 2012, 42(S3): 38-43.
- LI Ming, YAN Lei, HAN Shaoyang. The Basement Tectonic Charac-

teristics in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(S3): 38–43.

- 李玉宏, 王行运, 韩伟. 陕西渭河盆地氦气资源赋存状态及其意 义[J]. 地质通报, 2016, 35(2-3): 372-378.
- LI Yuhong, WANG Xingyun, HAN Wei. Mode of Occurrence of Helium in Weihe Basin, Shanxi Province and its Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2–3): 372–378.
- 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 Resource Investigation Theory and Technology[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 1–10.
- 李玉宏, 卢进才, 李金超, 等. 渭河盆地富氦天然气井分布特征 与氦气成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(81): 47-53.
- LI Yuhong, LU Jincai, LI Jinchao, et al. Distribution of the Helium-Rich Wells and Helium Derivation in Weihe Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(S1): 47–53.
- 刘超,孙蓓蕾,曾凡桂,等.鄂尔多斯盆地东缘石西区块含氦天然气的发现及成因初探[J].煤炭学报,2021,46(04): 1280-1287.
- LIU Chao, SUN Bei Lei, ZENG Fangui, et al. Discovery and Origin of Helium-Rich Gas on the Shixi area, Eastern Margin of the Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(04): 1280–1287.
- 刘凯旋,陈践发,付娆,等.威远气田富氦天然气分布规律及控制因素探讨[J].中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(4):12-21.
- LIU Kaixuan, CHEN Jianfa, FU Rao, et al. Discussion on distribution law and controlling factors of helium-rich natural gas in Weiyuan gas field[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(4): 12–21.
- 路利春,赵炳坤,周明霞,等.高精度重磁测量在渭河盆地氦气 调查中的应用研究[J].陕西地质,2017,35(02):52-59.
- LU Lichun, ZHAO Bingkun, ZHOU Mingxia, et al. High Precision Gravity and Magnetism Measurement Used in Helium Gas Investigation at the Weihe River Basin[J]. Geology of Shaanxi, 2017, 35(02): 52–59.
- 马涛,朱莹洁,杨永,等.基于重磁异常的嘉偕平顶山群构造区 划特征研究[J].物探与化探,2020,44(04):938-948.
- MA Tao, ZHU Yingjie, YANG Yong, et al. Research on Tectonic Division in Jiaxie Guyots Based on Gravity and Magnetic Anomalies[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2020, 44(04): 938–948.
- 孟军海,马龙,王金海,等.重力数据在德令哈地区区域性综合 解释中的开发应用研究[J].物探与化探,2021,45(02): 369-378.

- MENG Junhai, MA Long, WANG Jinhai, et al. The Development and Application of Gravity Data in Regional Comprehensive Interpretation of Delingha Region[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2021, 45(02); 369–378.
- 密文天,陈安清,张成弓,等.鄂尔多斯盆地富县上三叠统长8
 段砂体分布及成因模式[J].科学技术与工程,2016,16(29):13-19.
- MI Wentian, CHEN Anqing, ZHANG Chenggong, et al. Sandbody's Distribution and Genetic Model of Member Chang-8 of Yanchang Formation of Upper Triassic, Fuxian Area in Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(29): 13–19.
- 宁媛丽,周子阳,孙栋华.重磁资料在鄂尔多斯盆地西南缘基底 研究中的应用[J].物探与化探,2020,44(01):34-41.
- NING Yuanli, ZHOU Ziyang, SUN Donghua. The Application of Magnetic and Gravity Data on Research the Basement in the Southwest of Ordos Basin[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2020, 44(01): 34–41.
- 任战利,崔军平,李进步,等.鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造-热演化史恢复[J].地质学报,2014,88(11):2044-2056.
- REN Zhanli, CUI Junping, LI Jinbu, et al. Tectonic Thermal History Reconstruction of Ordovician in the Weibei Uplift of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 2044–2056.
- 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.
- 孙建博,孙兵华,赵谦平,等.鄂尔多斯盆地富县地区延长组长 7湖相页岩油地质特征及勘探潜力评价[J].中国石油勘探, 2018,23(06);29-37.
- SUN Jianbo, SUN Binghua, ZHAO Qianping, et al. Geological Characteristics and Exploration Potential Evaluation of Chang 7 Lacustrine Shale Oil in Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(06): 29–37.
- 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(02): 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(02): 307–314.
- 汤超. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿元素地球化学[D]. 北 京: 中国地质大学, 2014.
- TANG Chao. Elements Geochemistry of Sandstone Type Uranium Deposit, Northeast Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.

- 陶小晚,李建忠,赵力彬,等.我国氦气资源现状及首个特大型 富氦储量的发现:和田河气田[J].地球科学,2019,44(03): 1024-1041.
- TAO Xiaowan, LI Jianzhong, ZHAO Libin, et al. Helium Resources and Discovery of First Supergiant Helium Reserve in China: Hetianhe Gas Field[J]. Earth Science, 2019, 44(03): 1024–1041.
- 王万银,王云鹏,李建国,等.利用重、磁资料研究于都—赣县 矿集区盘古山地区断裂构造及花岗岩体分布[J].物探与 化探,2014,38(04):825-834.
- WANG Wanyin, WANG Yunpeng, LI Jianguo, et al. Study on the Faults Structure and Granite Body Distribution in Pangushan Area of Yudu-Ganxian Ore District Using Gravity and Magnetic Data[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2014, 38(04): 825–834.
- 王学发,王万银,马杰,等.基于重力资料的马达加斯加岛及邻 区盆地构造单元分布特征[J].物探与化探,2020,44(04): 928-937.
- WANG Xuefa, WANG Wanyin, MA Jie, et al. A Study of the Distribution Characteristics of Basin Tectonic Units Based on Gravity Data in Madagascar and its Adjacent Basins[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2020, 44(04): 928–937.
- 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.
- 魏柳斌,包洪平,严婷,等.鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组 五段5亚段微生物碳酸盐岩发育特征及储集意义[J].石 油学报,2021,42(08):1015-1025.
- WEI Liubin, BAO Hongping, YAN Ting, et al. Development Characteristics and Significance of Microbial Carbonate Reservoirs in the Fifth Submember of Member 5 of Ordovician Majiagou Formation in the Eastern Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(08): 1015–1025.
- 吴浩,张春林,纪友亮,等.致密砂岩孔喉大小表征及对储层物 性的控制——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 石油学报,2017,38(08):876-887.
- WU Hao, ZHANG Chunlin, JI Youliang, et al. Pore Throat Size Characterization of Tight Sandstone and its Control on Reservoir Physical Properties: A Case Study of Yanchang Formation, Eastern Gansu, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(08): 876–887.
- 徐兴雨.鄂尔多斯盆地断裂构造及其控藏作用研究[D].东营: 中国石油大学(华东),2020.
- XU Xingyu. Study on Faults Structure and Reservoir Control in Or-

dos Basin[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2020.

- 徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造环境[J]. 地学前缘, 1997, 4(3-4): 185-190.
- XU Yongchang. Helium Isotope Distribution of Natural Gasses and its Structural Setting[J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3–4); 185–190.
- 许文强, 袁炳强, 张春灌, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起带重磁场 特征[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(06): 114-120.
- XU Wenqiang, YUAN Bingqiang, ZHANG Chunguan, et al. Characteristics of Gravity and Magnetic Field in Weibei Uplift of Ordos basin[J]. Coal Geological & Exploration, 2015, 43(06): 114–120.
- 杨华, 刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(02): 129-137.
- YANG Hua, LIU Xinshe. Progress of Paleozoic Coal-Derived as Gxploration in Ordos Basin, West China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(02): 129–137.
- 张春灌,袁炳强,李玉宏,等.基于重磁资料的渭河盆地氦气资 源分布规律[J].地球物理学进展,2017,32(01):344-349.
- ZHANG Chunguan, YUANG Bingqiang, LI Yuhong, et al. Distribution of Helium Resources in Weihe Basin Based on Gravity and Magnetic data[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(01): 344–349.
- 张健,张海华,贺君玲,等.东北地区氦气成藏条件与资源前景 分析[J].西北地质,2023,56(1):117-128.
- ZHANG Jian, ZHANG Haihua, HE Junling, et al. Analysis of Helium Accumulation Conditions and Resource Prospect in Northeast China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 117–128.
- 张宇轩,吕鹏瑞,牛亚卓,等.全球氦气资源成藏背景、地质特征与产能格局初探[J].西北地质,2022,55(4):11-32.
- ZHANG Yuxuan, LÜ Pengrui, NIU Yazhuo, et al. Preliminary Study on the Geological Characteristics, Resource Potential and Production Capacity Pattern of Global Helium Resources[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 11–32.

- 赵安坤,王东,时志强,等.四川盆地及周缘地区氦气资源调查研究进展与未来工作方向[J].西北地质,2022,55(4):74-84.
- ZHAO Ankun, WANG Dong, SHI Zhiqiang, et al. Exploration Status and Helium Resource Potential of the Helium-bearing Natural Gas Field in Sichuan Basin and Its Surrounding Areas[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 74–84.
- 周俊林,李玉宏,魏建设,等. 渭河盆地固市凹陷华州北地区氦 气地质条件与富集模式[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 33-44.
- ZHOU Junlin, LI Yuhong, WEI Jianshe, et al. Geological Conditions and Enrichment Model of Helium in North Huazhou Area of Gushi Depression, Weihe Basin, China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 33–44.
- 周正. 鄂尔多斯南缘构造特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- ZHOU Zheng. Research on the Structural Characteristics of the Southern Region of Ordos [D]. Xi 'an: Northwest University, 2009.
- 邹勇军,肖富强,章双龙,等.江西省温泉伴生气氦含量特征及 其成因分析[J].西北地质,2022,55(4):85-94.
- ZOU Yongjun, XIAO Fuqiang, ZHANG Shuanglong, et al. Characteristics and Causes of Helium Content in Hot Spring Associated Gas of Jiangxi Province[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 85–94.
- Feng Xuliang, Yuan Bingqiang, Li Yuhong, et al, Distribution of Helium Resources in Weihe Basin, Central China: Insight from 3D Magnetic Inversion[J]. Journal of Earth Science, 2022, 33(4): 977–992.
- Wang Xiaofeng, Liu Wenhui, Li Xiaobo, et al. Radiogenic Helium Concentration and Isotope Variations in Crustal Gas Pools from Sichuan Basin, China[J]. Applied Geochemistry, 2020, 117: 104586.
- Wang Wanyin, Pan Yu, Qiu Zhiyun. A New Edge Recognition Technology Based on the Normalized Vertical Derivative of the Total Horizontal Derivative for Potential Field Data[J]. Applied Geophysics, 2009, 6(03): 226–233.