



· 青年编委专刊(地球科学) ·

鄂尔多斯盆地北部晚侏罗世—早白垩世岩浆活动 对氦气富集成藏的控制机制

秦江锋,王东旭,弓虎军

(西北大学 地质学系/大陆演化与早期生命全国重点实验室,陕西 西安 710069)

摘要 基于含气地层氦气体积分数测试数据,结合周缘岩浆岩的地球化学特征与年代学分析,系统研究岩浆活动与氦气空间分布的耦合关系,并针对氦气供给、运移通道、储集条件及成藏期次等关键因素,构建岩浆活动影响氦气富集的动力学模型,探讨晚侏罗世—早白垩世岩浆活动对氦气富集、运移及保存的控制作用,为鄂尔多斯盆地氦气资源勘探提供理论依据与创新思路。研究发现,盆地北部氦气富集显著,庆阳、宜川、鄂尔多斯及石西地区平均体积分数大于0.09%,呈现“沉积拗陷低值区→盆地边缘高值带”的环状分异规律。周缘岩浆活动集中于160~100 Ma(晚侏罗世—早白垩世),其时空分布与氦气高丰度区、成藏关键期高度匹配,指示慢源岩浆上涌可能通过热-流-力多场耦合作用促进氦气富集。研究认为,鄂尔多斯盆地氦气富集受控于晚中生代慢源岩浆活动的多尺度效应,表现为岩浆热事件对氦源活化、运移通道构建及圈闭形成的系统性调控。由此提出富氦气藏勘探应聚焦晚侏罗世—早白垩世岩体侵位中心,采用“由岩体核部向外围扩散”的靶区优选策略。

关键词 富氦气藏;岩浆作用;鄂尔多斯盆地;克拉通盆地

中图分类号:P61 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2025-03-006

Control mechanism of Late Jurassic-Early Cretaceous magmatic activities on helium accumulation in the northern Ordos Basin

QIN Jiangfeng, WANG Dongxu, GONG Hujun

(State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract By integrating helium volume fraction data from gas-bearing strata with geochemical and geochronological analyses of peripheral magmatic rocks, we systematically examined the spatiotemporal coupling between magmatism and helium distribution. A dynamic model was established to elucidate the influence of magmatic activity on helium enrichment, emphasizing key factors including helium sources, migration pathways, reservoir conditions, and accumulation episodes. This study focuses on investigating the controlling effects of Late Jurassic-Early Cretaceous magmatic activity on helium enrichment, migration, and preservation in the Ordos Basin, aiming to provide theoretical foundations and innovative insights for helium resource exploration. Significant helium enrichment was identified in the northern Ordos Basin, particularly in the Qingyang, Yichuan,

收稿日期:2025-03-16

基金项目:国家自然科学基金(42172010,42372071,41102037)

第一作者:秦江锋,男,教授,博士生导师,从事岩浆岩成因科学研究,qinjf@nwu.edu.cn。

通信作者:弓虎军,男,教授,博士生导师,从事油气地质与盆地分析研究,gonghj@nwu.edu.cn。

Dongsheng, and Shixi areas, where average helium fractions exceed 0.09%. The spatial pattern exhibits an annular differentiation trend, transitioning from low-value zones in sedimentary depressions to high-value belts along the basin margins. Magmatic activity in the basin periphery (160 ~ 100 Ma, Late Jurassic-Early Cretaceous) demonstrates spatiotemporal synchronization with helium-rich zones and critical accumulation episodes. This correlation suggests that mantle-derived magma upwelling likely enhanced helium enrichment through thermo-fluid-mechanical coupling processes. Helium enrichment in the Ordos Basin is governed by multi-scale effects of Late Mesozoic mantle-derived magmatism, manifesting as systematic regulation of helium source activation, migration channel development, and trap formation by magmatic thermal events. Accordingly, we propose that helium-rich reservoir exploration should prioritize areas surrounding Late Jurassic-Early Cretaceous pluton emplacement centers, adopting a target prioritization strategy of "radiating outward from pluton cores" to identify favorable gas reservoirs.

Keywords He-rich reservoir; magmatism; Ordos Basin; craton basin

全球富氦天然气藏主要分布于欧洲东部、西伯利亚地区中部、非洲北部和东南部以及北美洲南部和中部等地(氦气体积分数>0.1%)。富氦天然气田主要形成于晚元古代—古生代克拉通沉积盆地中,这些沉积盆地一般埋深小于3 500 m,大多具有太古界—元古界的结晶基底,且具有地层时代越古老、氦气含量越高的特征(见图1);另一方面,这些盆地中新生代以来,深层具有强烈的岩浆活动和断裂活动^[1]。因此,克拉通沉积盆地中富氦天然气藏的控制因素是当前研究的热点。目前,关于富氦天然气藏形成的控制因素存在以下观点:①太古代结晶基底的U、Th元素衰变产生⁴He,后期通过孔隙、裂隙和断裂系统进行运聚

成藏^[2-5];②幔源岩浆活动携带幔源氦(³He)以及岩体自身放射生成的⁴He可能作为氦气成藏的直接来源,并通过新生与激活的断裂系统进行运聚成藏^[6-14]。

鄂尔多斯盆地是典型的克拉通盆地,具有古老的结晶基底,并在晚中生代太平洋板块的俯冲作用下,经历了地台活化过程^[15-17],于盆地周缘形成了多期幔源岩浆活动^[18],具有较好的成藏潜质。本研究结合盆地含氦气层的气样检测结果、盆地周缘岩浆岩体的年代学、地球化学数据进行综合分析,为鄂尔多斯盆地氦气藏的勘探开发,提供合理的思路。

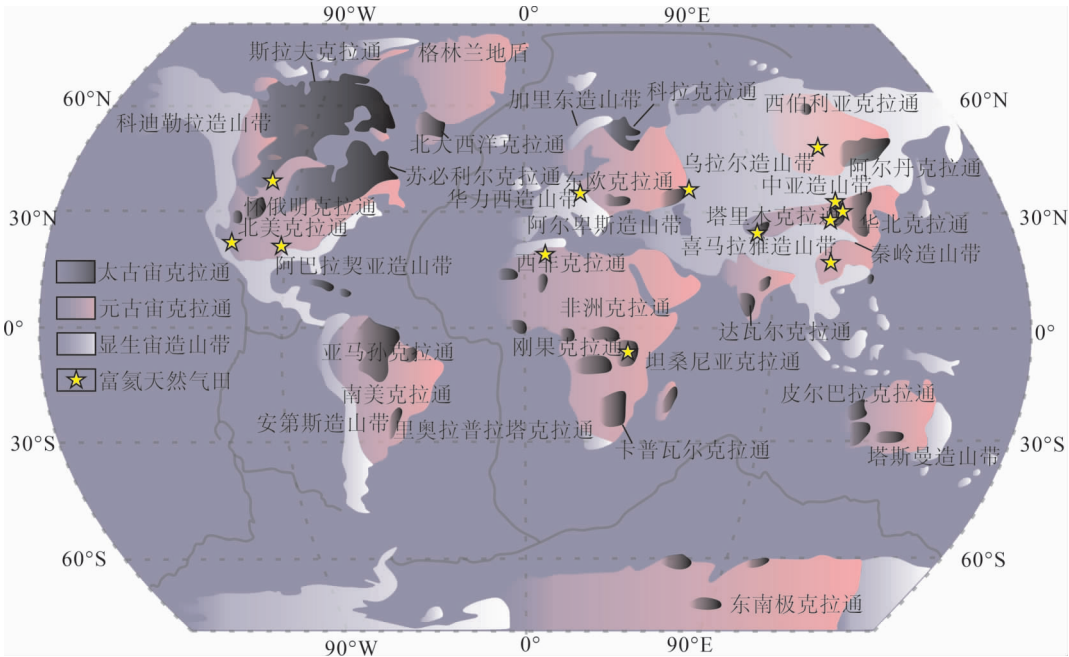


图1 富氦天然气田与基底分布特征(修改自文献[1])

Fig. 1 Distribution of Helium-rich natural gas fields and basement characteristics

1 鄂尔多斯盆地氦气体积分数分布特征

由于近年来加强了对鄂尔多斯盆地氦气数据的测试工作^[11-13,19],现在整个盆地内氦气体积分数的测试数据基本覆盖(见图2,表1)。通过已有测试数据的整理和分析可以看出,鄂尔多斯盆地氦气体积分数平均值为0.02%~0.14%,其中庆阳、宜川、鄂尔多斯和石西地区平均值大于0.09%,出现富氦现象,而盆地其他区域氦气含量偏低;整体上表现为内部坳陷深埋区的气样具有较低的氦气体积分数,而盆地周缘气样具有较高的氦气体积分数,整体具有由内向外逐渐富集的趋势。该特征也反映出,有机天然气与氦气在成藏区域上具有明显的差别。

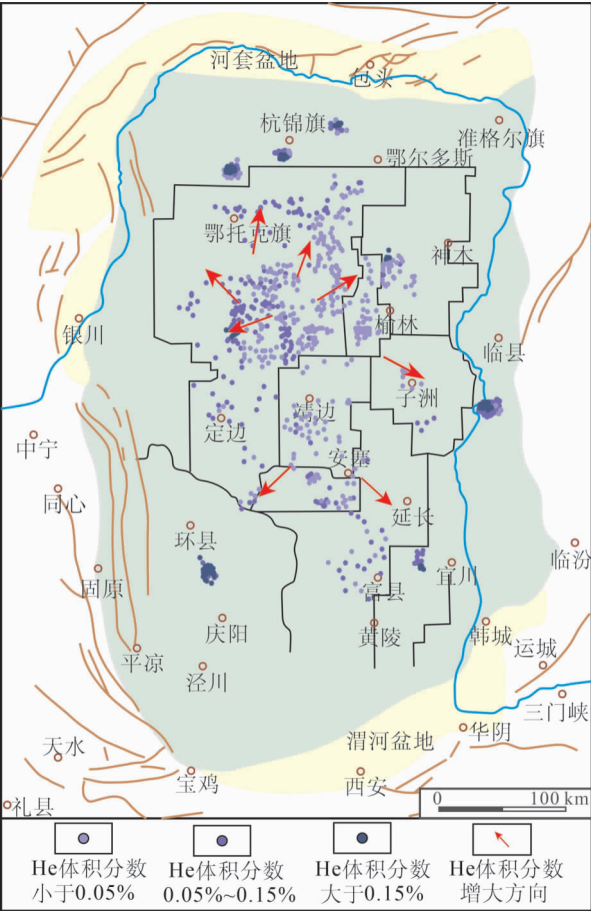


图2 鄂尔多斯盆地氦气含量分布图

Fig. 2 Distribution of Helium content in Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地不同地区氦气体积分数			
Tab. 1 Helium content in different region of the Ordos Basin			
地区	氦气体积分数/%	平均值/%	数据来源
庆阳	0.121~0.204	0.14	文献[13]
宜川	0.060~0.177	0.09	
苏里格	0.018~0.168	0.05	
靖边—高桥	0.016~0.080	0.04	
子洲—米脂	0.027~0.039	0.03	
神木	0.016~0.27	0.03	
榆林	0.001~0.036	0.03	
石西	0.02~0.23	0.09	文献[11]
鄂尔多斯	0.045~0.487	0.12	文献[12]
黄龙	0.23		文献[19]
子洲—米脂	0.04		
榆林气田	0.03		
苏里格东区	0.04		
苏里格中区	0.06		
苏里格南区	0.11		
苏里格西区	0.1		
神木气田	0.03		
东胜气田	0.13		
庆阳气田	0.07		
鄂尔多斯盆地中部	0.036~0.062	0.05	本文研究

2 鄂尔多斯盆地岩浆活动的基本特征

鄂尔多斯盆地岩浆活动的发育时限集中在晚侏罗世早期—早白垩世末期(见图3),与鄂尔多斯地台活化期一致,反应了广泛的深部热事件。如图3所示,其岩体主要分布于盆地周缘,包括杭锦旗、宁夏、固原、灵台、宝鸡、平凉、庆阳、临汾、吕梁和榆林等地。其中,盆地北部的杭锦旗玄武岩,东部的紫金山碱性杂岩、金伯利岩,西南部的隐伏岩体等都被认为是氦的重要来源^[11-13]。综合盆

地周缘的岩浆岩体资料可以发现,其岩体性质主要为碱性岩和玄武岩^[18,20-26],是地幔岩浆活动的产物。

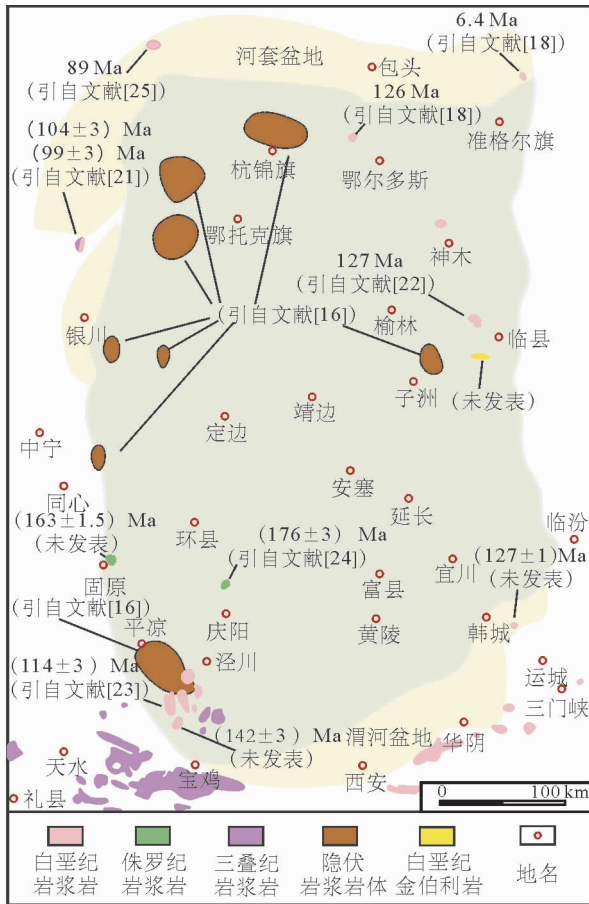


图 3 鄂尔多斯盆地周缘岩浆岩体分布情况及形成时代
Fig. 3 Spatial distribution and formation ages of magmatic rocks along the Ordos Basin margins

3 讨论

3.1 鄂尔多斯盆地幔源岩浆活动对氦气富集成藏的影响潜力

在空间上,通过采集盆地气样、周缘岩浆岩体及前人的测试数据,汇总整理可以发现,研究区的岩浆活动主要分布于盆地边缘,而盆地的氦气体积分数亦在边缘偏高,整体表现出由内向外逐渐上升的趋势,且富集方向与岩浆岩体的分布区域具有较大的空间吻合关系(见图 4),表现出岩浆活动对氦气富集的潜在影响。

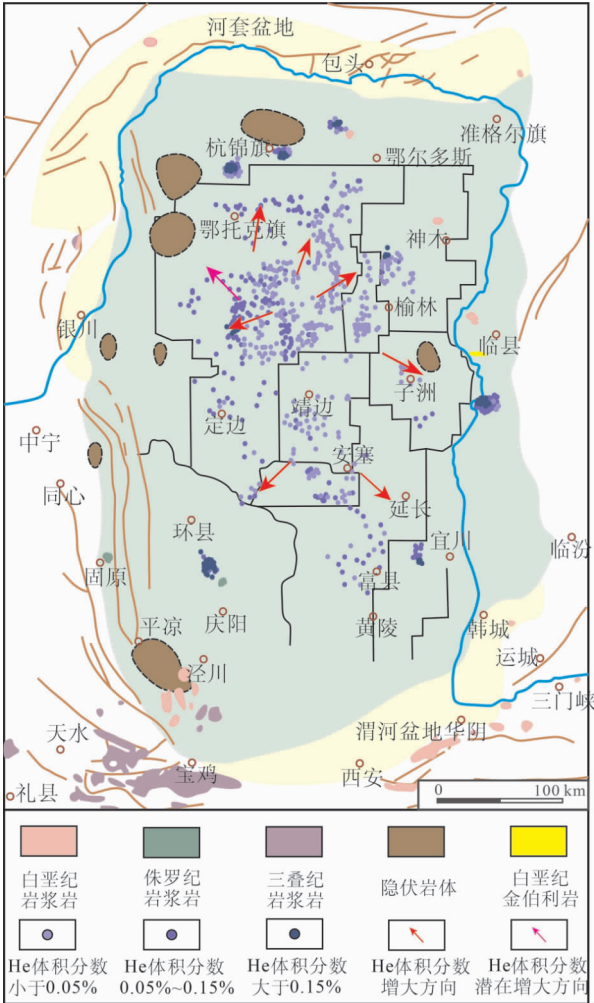


图 4 鄂尔多斯盆地岩浆岩体与氦气体积分数空间分布关系
Fig. 4 Distribution relationship between magmatic rocks and Helium contents in Ordos Basin

3.2 岩浆活动对氦气成藏的影响方式及耦合关系

氦源包括壳源氦和幔源氦,其中壳源氦主要通过地层中富集 U、Th 元素的岩体(氦源岩)发生衰变反应产生(见图 5)。如图 5 所示,3 大岩类均

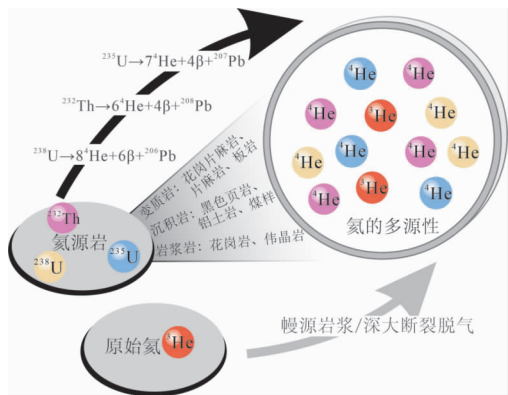


图 5 氦气类型及来源示意图
Fig. 5 Helium types and sources

存在具有生氦潜力的岩石类型,包括岩浆岩中的花岗岩、伟晶岩等;沉积岩中的黑色页岩、铝土岩和铀矿化异常层等;变质岩中的片麻岩、花岗片麻岩及板岩等^[7,27]。幔源氦,主要通过地幔起源的岩浆活动或者深大断裂发生运移,对氦气成藏进行补给^[6-10,14]。晚中生代,岩浆岩体的放射性衰变气被认为是鄂尔多斯盆地的有效氦源^[11-14]。在幔源氦气供给方面,鄂尔多斯盆地晚中生代发育多期幔源岩浆活动^[18],具有幔源氦气供给的巨大潜力。

关于氦原子从岩石/矿物晶格中如何完成释放,主要存在两种不同的观点。稳定释放机制认为,⁴He 主要来自于漫长的地质历史时期稳定释放^[28]。但 Torgersen 和 Clarke^[29] 研究表明,氦的积累由⁴He 脱气的垂直通量加上原位速率控制,因此随着时间的推移,尽管衰变会产生大量的⁴He,但主要在矿物、岩石中积聚^[29-30]。而幕式释放机制认为,在非稳定地质条件下(如岩浆或火山活动),空间温度随地质活动的发展而升高,高温环境使壳源氦从母源中的释放过程被加速^[31-32]。这是由于不同矿物对氦原子具有不同的封闭温度,因此,温度条件决定了氦是否可以从矿物晶格中完成有效释放^[31-32],且温度场越高,构造作用催生与激活的裂隙越多,氦原子的释放条件越有利^[1,31-32]。因此,氦原子的初次运移与高温场以及氦源岩的裂隙发育程度息息相关。鄂尔多斯盆地晚中生代存在区域性岩浆热事件^[17-18,33],代表了深部至浅部的强烈地质活动,有激发热场与催生、激活氦源岩形成裂隙的潜力,对氦原子的同期集中释放提供了可能。

由于氦气具有与常规石油、天然气相似的物理化学特性,因此其二次运移机制同样受地层的孔隙度、渗透率和毛细管压力的影响^[1];此外,氦具有组分含量小、化学性质稳定的特征,又使其有别于传统天然气的运移机制^[4]。地壳中氦气含量低,无法单独形成连续气流,其运移过程必须依附于地层中的活跃熔、流体的帮助^[5,30,34]。该理论被用于解释 Panhandle 富氦天然气藏(美国)的形成,该过程中氦原子主要的依附介质为地层中的高矿化度热流体^[35]。岩浆在侵位过程中以熔体的形式进行移动,包含脱气、脱水等演化过程,可对氦起到运移“介质”的作用^[36],这也是沉积盆地油气藏中可发现相当数量幔源氦的原因。鄂尔多斯盆地晚中生代发育的多期幔源岩浆活动产生的异常热液活动,同样具有承担氦气运移“介质”的潜力。

由于强烈的构造运动或岩浆活动而形成的断裂体系,被认为是氦气二次运移的主要通道^[1,37]。美国黄石公园在地幔柱作用的影响下,断裂系统开启、形成,使得太古代克拉通岩石中累计达 2 500 Ma 的氦气在 2 Ma 内于迅速释放^[9]。即在构造和岩浆活动的控制下,氦气将处于活跃的开放系统中^[1,9]。鄂尔多斯盆地发育富平—韩城(F1)、宁县—富县—离石(F2)、平凉—吴起—大同(F3)和鄂托克旗—乌审旗(F4)4 条切穿基底的一级断裂构造,以及东西向、北东向和北西向的多组隐性断裂带(见图 6)^[16,38-39]。晚中生代,盆地边缘的幔源岩浆活动,可在其影响范围内造成与激活通达储层的断裂和裂缝,为氦气运移提供有效的输导系统^[5,9,36]。

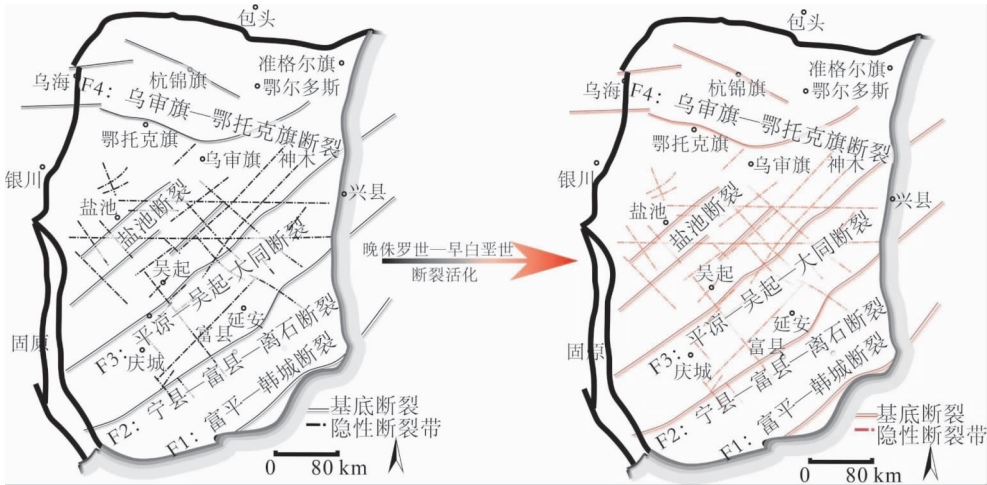


图 6 鄂尔多斯盆地基底断裂和隐性断裂分布图(修改自文献[38-39])

Fig. 6 Distribution map of basement primary faults and potential faults

氮原子具有甚至小于页岩纳米级孔隙的分子直径,因此一般的致密盖层防止氦气发生扩散或分馏的能力有限^[1,5]。研究表明,富氦气藏的盖层系统通常为致密膏盐层、盐岩和页岩^[2],这与氮原子在盐水环境中具有较高的亨利系数有关^[7](见图 7),它代表了在盐水环境中氦气的低溶解度特性^[40],因此富盐地层具备了更强的防扩散能力。该实验和理论与致密膏岩层对 Hugoton(美国)富氦气藏形成起到控制作用的地质现象及地质解释一致^[1]。鄂尔多斯盆地上古生界盖层类型较多,包括砂岩为主的局部盖层和泥岩、铝土岩为主的区域盖层。地幔岩浆熔体在侵位过程中可通过释放 F、Cl 等组分来改变地层水的矿化度,从而加强地层的封盖能力,也可自身形成侧向遮挡圈闭。由于氦气比烃类气要求更为苛刻的封盖和保存条件,气藏(层)后期调整和破坏时,氦气散失量明显高于烃类气(分子直径: H_2O 为 0.4 nm; CH_4 为 0.414 nm; He 为 0.26 nm)。考虑到岩浆活动的应力释放也会对盖层产生一定的破坏,因此在排除直接的岩浆岩圈闭后,应以岩浆侵入或喷出点为圆心进行盖层的扩散式寻找。

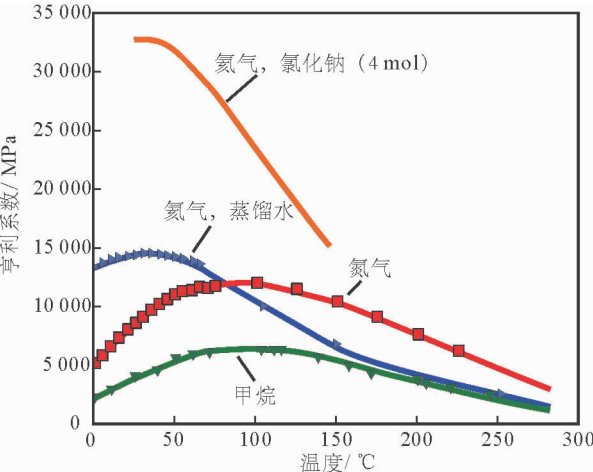


图 7 低压、低温条件下不同气体亨利系数(修改自文献[7])

Fig. 7 Henry's coefficient of different gases under low pressure and temperature conditions

在时间与空间上,晚古生代受古太平洋板块的俯冲影响,盆地发生了明显的地台活化^[15-17],发育多期岩浆活动,造成广泛热事件^[18,33]。在盆地埋深加大的叠合影响下,鄂尔多斯盆地天然气生气速率自晚侏罗世开始大幅度上升,自早白垩世末期达到峰值^[41],该时期又是主要的天然气成藏期,反映该时期盆地内部有机气活动性达到峰

值^[12,26,33,41](见图 8)。氦气作为寄生气,具有依赖气体运移和同期成藏的特征,因此其运移成藏受到天然气生成、运移、聚集的峰期影响^[5],从侧面反应出,该期岩浆活动对氦气成藏在时间上的控制作用。另一方面,岩浆活动形成的高温地热场,可以有效地帮助氦气发生初次运移,形成氦气的运移峰期^[5]。

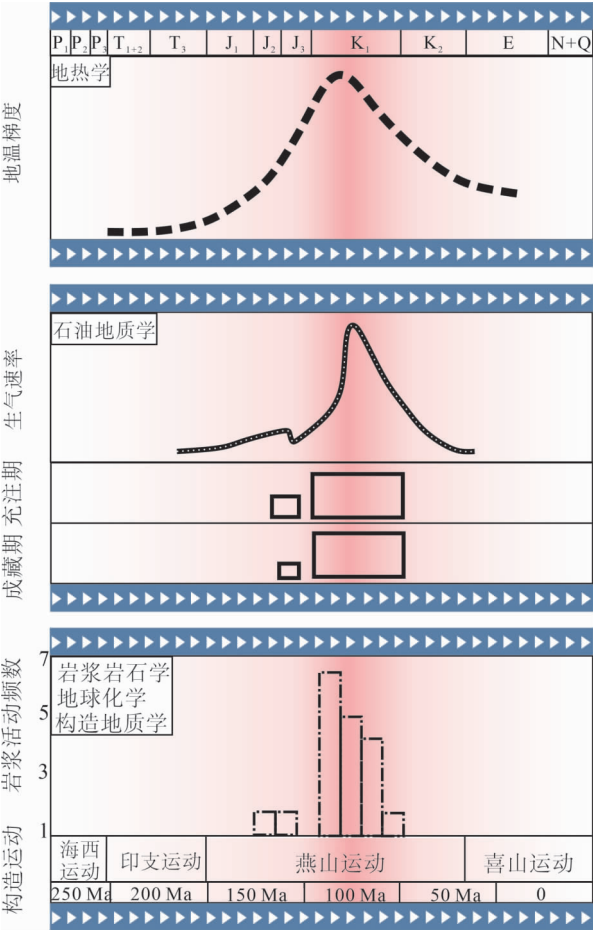


图 8 鄂尔多斯盆地岩浆活动与氦气成藏演化过程的时间耦合关系(修改自文献[41])

Fig. 8 The time coupling relationship between magmatic activity and Helium accumulation evolution process in Ordos Basin

综上所述,通过鄂尔多斯盆地晚中生代幔源岩浆活动与含或富氦天然气藏的成藏期(见图 8)以及最终氦气体积分数的时空耦合关系(见图 4)可以得知,在整个氦气成藏演化过程的前后均可与岩浆活动的区域和时限进行匹配,表明岩浆活动对其成藏演化的巨大影响潜力。岩浆活动可以对氦气富集的多个要素产生影响,因此,晚中生代幔源岩浆活动对富氦天然气藏的形成具有控制作用,是理论与现实层面双重约束下的推论。

鄂尔多斯盆地晚中生代幔源岩浆活动与盆地的氦气体积分数分布、氦气富集成藏要素和成藏期次,在时间和空间上具有较好的耦合关系,反映了其可能对氦气成藏过程产生了巨大的影响。地幔熔融产物具有携带幔源氦与产生壳源氦的潜力,是有效的氦源^[11-13];随着深部地幔岩浆的上涌和底侵,使得整个盆地的大地热流值增加,地温梯度增加,形成遍及全盆的增温效应,叠合部分上升侵位的岩浆所释放的巨大热能^[42],促使氦气分子大量快速地从氦源岩或矿物晶格中完成初次运移(见图9)。作为深部地幔部分熔融的产物,在其侵位冷凝的过程中,拥有沟通沉积地层的能力

(见图9),强大的应力释放,使得周围地层发生破碎,造成断裂和破碎带的形成,也使得古老断裂得以重新开启,形成长期稳定的氦气运移通道。幔源氦分子与长期衰变产生的大量壳源氦气分子,在整个岩浆活动改造周期内快速释放^[1,5-10],依靠岩浆产生的熔流体介质,沿着岩浆活动相关运移通道发生二次运移,并最终在以岩体侵位冷凝点为圆心的就近圈闭完成成藏(见图9)。综上所述,幔源岩浆活动控制下的氦气富集成藏模式可以概括为:原生氦源、增温释氦、穿层造裂、熔流助运、围点成藏5个关键点。

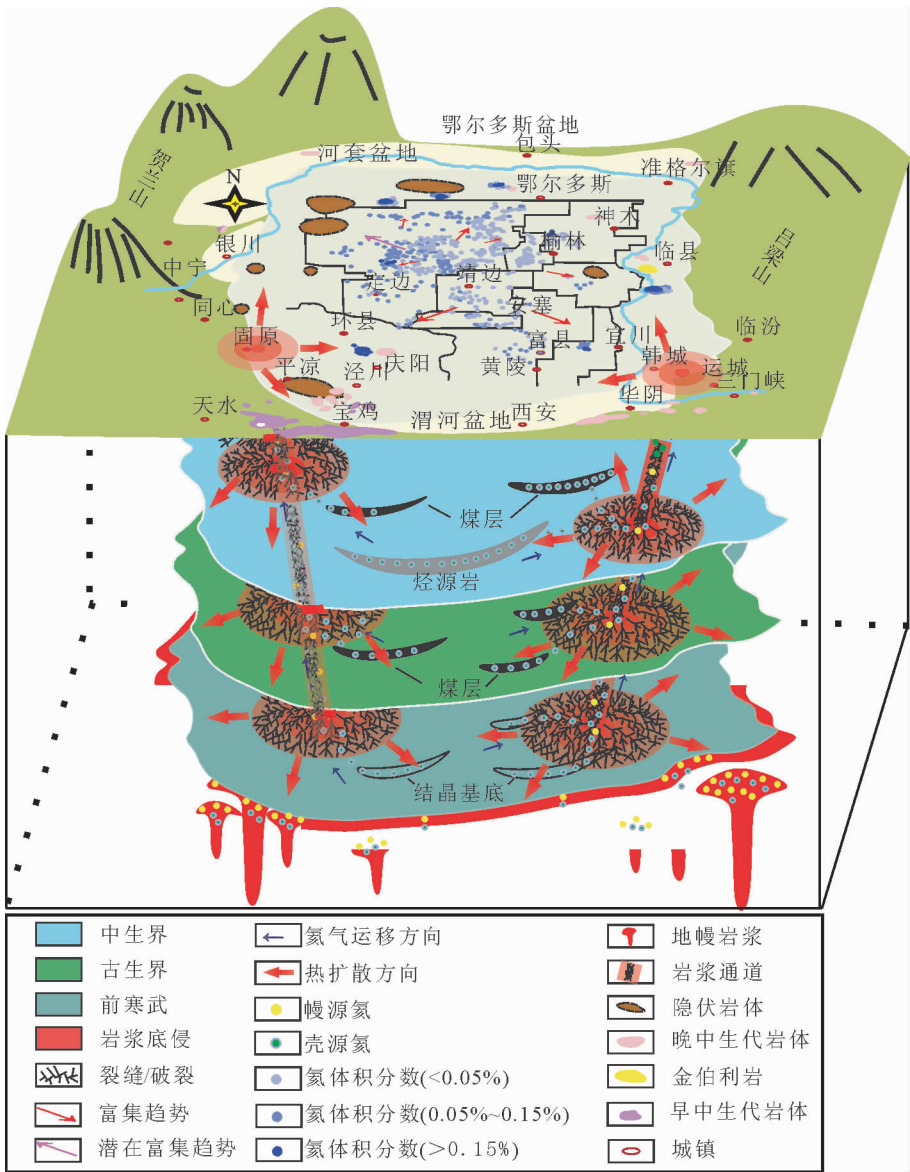


图9 幔源岩浆在活动过程中对氦气富集的影响方式

Fig.9 The influence of mantle-derived magma in Helium accumulation process

4 岩浆活动控制下可能的氦气有利富集区

氦气具有漫长的衰变周期,因此缺少生氦峰期,多以寄生气的形式赋存于天然气藏中^[7,41]。鄂尔多斯盆地含气层系包括下古生界碳酸盐岩和上古生界碎屑岩^[43],均为潜在的氦气储集层(见图 10)。研究区下古生界主要发育马家沟组含气地层,形成了奥陶系顶部风化壳型气藏及白云岩型气藏,以靖边气田为代表;上古生界主要发育石

炭系本溪组以及二叠系太原组、山西组、石盒子组、石千峰组等含气层系,形成砂岩岩性气藏,以苏里格、榆林、神木等气田为代表^[43]。页岩气和煤层气原位储层中富氦情况并不多见。

目前勘探结果表明,研究区氦气富集层位主要为石炭—二叠系地层,表明存在深部通道进行了氦气的补给。考虑岩浆活动对氦气富集成藏的影响,有利区勘探应以岩体侵位冷凝点为圆心,扩散式寻找有利的天然气储层,达到缩小勘探范围,提高勘探效率的目的。

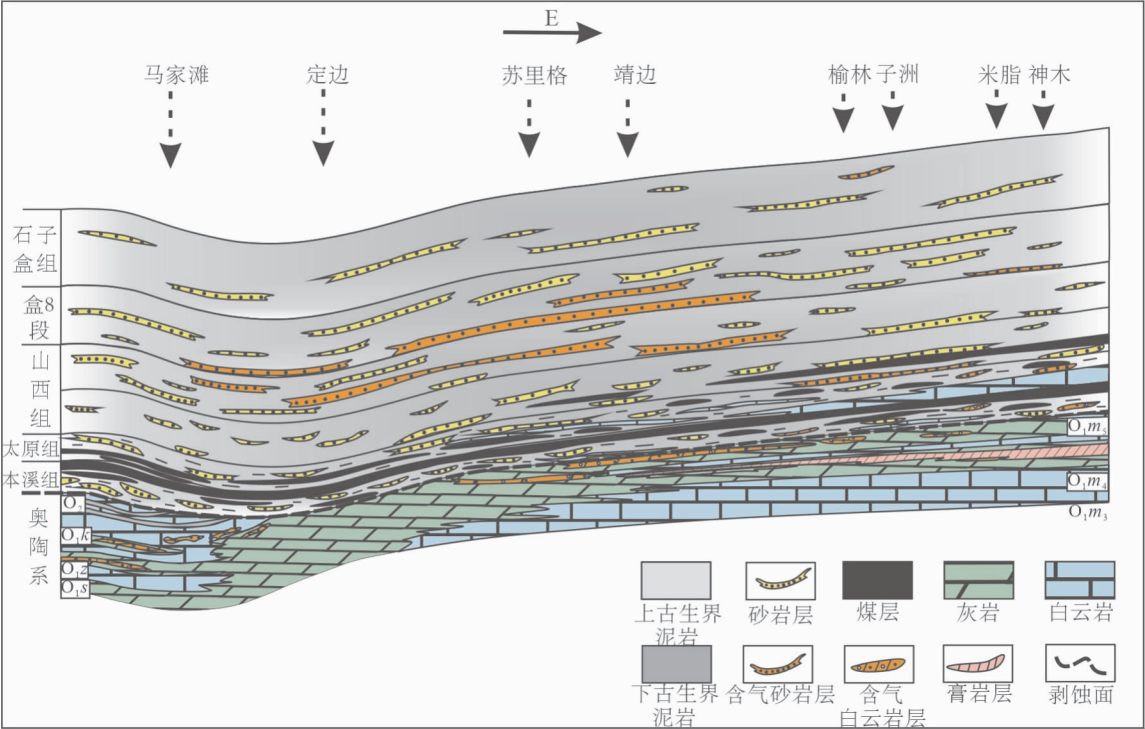


图 10 鄂尔多斯盆地古生界储层类型及分布特征(修改自文献[43])

Fig. 10 Paleozoic reservoir types and distribution characteristics in Ordos Basin

5 结论

本研究揭示了鄂尔多斯盆地晚侏罗世—早白垩世幔源岩浆活动对氦气富集成藏的多维度控制机制,提出岩浆活动(160~100 Ma)与氦气高丰度区(>009%)在时空上高度匹配,表明岩浆热-流-力多场耦合作用驱动了氦气富集,形成“沉积拗陷低值区→边缘高值带”的环状分异格局;总结出岩浆活动控制氦气成藏的5大核心过程——原生氦源供给、热扰动释氦、穿层裂隙输导、熔流介质助运、环岩体圈闭成藏;系统解析了氦源活化、运移通道构建及圈闭形成的联动机制。该研

究不仅深化了克拉通盆地氦气成藏理论,揭示了岩浆热事件对稀有气体资源的关键控制作用,还为鄂尔多斯盆地氦气的高效勘探提供了科学依据,对全球类似盆地的氦气资源评价与开发具有重要借鉴价值。

参考文献

[1] 陈践发,刘凯旋,董劭伟,等. 天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1436-1449.
CHEN J F, LIU K X, DONG Q W, et al. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1436-1449.

- [2] 李玉宏,周俊林,张文,等. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M]. 北京:地质出版社,2018.
- [3] ZHANG W, LI Y H, ZHAO F H, et al. Using noble gases to trace groundwater evolution and assess helium accumulation in Weihe Basin, central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 251: 229-246.
- [4] 秦胜飞,李济远,王佳美,等. 中国含油气盆地富氦天然气藏氦气富集模式[J]. *天然气工业*, 2022, 42(7): 125-134.
- QIN S F, LI J Y, WANG J M, et al. Helium enrichment model of helium-rich gas reservoirs in petroliferous basins in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 125-134.
- [5] 陶士振,杨怡青,陈悦,等. 氦气资源形成地质条件、成因机理与富集规律[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 436-452.
- TAO S Z, YANG Y Q, CHEN Y, et al. Geological conditions, genetic mechanisms and accumulation patterns of helium resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 436-452.
- [6] 冯子辉,霍秋立,王雪. 松辽盆地北部氦气成藏特征研究[J]. *天然气工业*, 2001, 21(5): 27-30.
- FENG Z H, HUO Q L, WANG X. A study of helium reservoir formation characteristic in the north part of Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(5): 27-30.
- [7] BROWN A A. Formation of high helium gases: A guide for explorationists[C]//Poster presentation at AAPGC onvention. New Orleans. Louisiana: American Association of Petroleum Geologists, 2010: 11-14.
- [8] 陶士振,戴金星,邹才能,等. 松辽盆地火山岩包裹体稀有气体同位素与天然气成因成藏示踪[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 927-938.
- TAO S Z, DAI J X, ZOU C N, et al. The trace of genesis, formation and mineral resources of natural gas and rare gas isotope existing in volcanic inclusion of Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 927-938.
- [9] LOWENSTERN J B, EVABS W C, BERGFEL D, et al. Prodigious degassing of a billion years of accumulated radiogenic helium at Yellowstone[J]. *Nature*, 2014, 506: 355-358.
- [10] HAND E. Massive helium fields found in rift zone of Tanzania[J]. *Science*, 2016, 353(6295): 109-110.
- [11] 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(4): 1280-1287.
- LIU C, SUN B L, ZENG F G, 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(4): 1280-1287.
- [12] 何发岐,王杰,赵永强,等. 鄂尔多斯盆地东胜富氦气田成藏特征及其大地构造背景[J]. *古地理学报*, 2022, 24(5): 937-950.
- HE F Q, WANG J, ZHAO Y Q, et al. Accumulation characteristics of Dongsheng helium-rich gas field in Ordos Basin and its tectonic background[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(5): 937-950.
- [13] 惠洁,康锐,赵伟波,等. 鄂尔多斯盆地氦气特征及生成潜力[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(9): 1-21.
- HUI J, KANG R, ZHAO W B, et al. Helium characteristics and potential in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(9): 1688-1698.
- [14] MULAYA E, GLUYAS J G, MCCAFFREY K J W, et al. Structural geometry and evolution of the Rukwa Rift Basin, Tanzania: Implications for helium potential[J]. *Basin Research*, 2021, 34: 938-960.
- [15] 朱日祥,陈凌,吴福元,等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(5): 583-592.
- ZHU R X, CHEN L, WU F Y, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2011, 54(6): 789-797.
- [16] 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 D F, BAO H P, KAI B Z, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1255-1269.
- [17] ZOU C N, LI Y, HE X F, et al. Contrasting hydrocarbon reservoirs in the North China Craton in relation to inhomogeneous craton destruction[J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 255: 104843.
- [18] 邹和平,张珂,刘玉亮,等. 鄂尔多斯地块北部中、新生代玄武岩地球化学特征及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(1): 92-104.
- ZOU H P, ZHANG K, LIU Y L, et al. Geochemical characteristics and their geological implications of Mesozoic Basalts in the northern Ordos Block North China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(1): 92-104.

- [19] 刘成林,丁振刚,范立勇,等. 鄂尔多斯盆地含氦天然气地球化学特征与富集影响因素[J]. 石油与天然气地质,2024,45(2): 384-392.
- LIU C L, DING Z G, FAN L Y, et al. Geochemical characteristics and enrichment factors of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 384-392.
- [20] 阎国翰,牟保磊,曾贻善. 山西临县紫金山碱性岩-碳酸岩杂岩体的稀土元素和氧锶同位素特征[J]. 岩石学报,1988,4(3): 29-36.
- YAN G H, MOU B L, ZENG Y S. Characteristics of REE, oxygen and strontium isotope composition for the Zijinshan alkaline rocks-carbonatite complex in Shanxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1988, 4(3): 29-36.
- [21] 高山林,李芳,李天斌,等. 汝箕沟晚中生代玄武岩的确定与煤变质作用关系简论[J]. 煤田地质与勘探,2003,31(3): 8-10.
- GAO S L, LI F, LI T F, et al. Discussion of the relationship between coal metamorphism and the Late Mesozoic basalt in Rujigou Area[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 8-10.
- [22] YING J F, ZHANG H F, SUN M, et al. Petrology and geochemistry of Zijinshan alkaline intrusive complex in Shanxi Province, western North China Craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime[J]. Lithos, 2007, 98(1/2/3/4): 45-66.
- [23] 翁凯,李荣西,徐学义,等. 鄂尔多斯盆地西南缘龙门隐伏碱性杂岩体地球化学特征[J]. 新疆地质, 2012,30(4): 471-476.
- WENG K, LI R X, XU X Y, et al. Geochemistry characteristic of Longmen concealed alkaline intrusive complex in southwest Ordos Basin[J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(4): 471-476.
- [24] 席胜利,李振宏,刘新社. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代火成碳酸盐岩的发现及意义[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2): 173-179.
- XI S L, LI Z H, LIU X S. Discovery and significance of the Mesozoic igneous carbonate rock at the southwestern margin of Ordos Basin[J]. Oil & Gas geology, 2016, 37(2): 173-179.
- [25] DAI H K, ZHENG J P, O'REILLY S Y, et al. Langshan basalts record recycled Paleo-Asian oceanic materials beneath the northwest North China Craton[J]. Chemical Geology, 2019, 524: 88-103.
- [26] YU K, JU Y W, QI Y, et al. Geological process of Late Paleozoic shale gas generation in the eastern Ordos Basin, China: Revelations from geochemistry and basin modeling[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 229: 103569.
- [27] BROWN A A. Origin of helium and nitrogen in the Panhandle-Hugoton field of Texas, Oklahoma, and Kansas, United States[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(2): 369-403.
- [28] TORGERSEN T, CLARKE W B. Helium accumulation in groundwater, I: An evaluation of sources and the continental flux of crustal ^4He in the Great Artesian Basin, Australia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(5): 1211-1218.
- [29] TORGERSEN T, CLARKE W B. Helium accumulation in groundwater, III: Limits on helium transfer across the mantle-crust boundary beneath Australia and the magnitude of mantle degassing[J]. Earth Planetary Science Letters, 1987, 84(2/3): 345-355.
- [30] HOLLAND G, LOLLAR B S, LI L, et al. Deep fracture fluids isolated in the crust since the Precambrian[J]. Nature, 2013, 497: 357-360.
- [31] DELON R, DEMOUCHEY S, MARROCCHI Y, et al. Helium incorporation and diffusion in polycrystalline olivine[J]. Chemical Geology, 2018, 488: 105-124.
- [32] DELON R, DEMOUCHEY S, MARROCCHI Y, et al. Effect of deformation on helium storage and diffusion in polycrystalline forsterite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 273: 226-243.
- [33] 任战利,祁凯,刘润川,等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J]. 岩石学报,2020,36(4): 1213-1234.
- REN Z L, QI K, LIU R C, et al. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(4): 1213-1234.
- [34] CHENG A R, SHERWOOD L B, GLUYAS J G, et al. Primary N_2 -He gas field formation in intracratonic sedimentary basins[J]. Nature, 2023, 615: 94-99.
- [35] SORENSON R P. A dynamic model for the Permian Panhandle and Hugoton fields, western Anadarko Basin[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89: 921-938.
- [36] GOLD T, HELD M. Helium-nitrogen-methane systematics in natural gases of Texas and Kansas[J]. Journal of Petroleum Geology, 1987, 10(4): 415-424.
- [37] KENEDY B M, VAN SOEST M C. A helium isotope perspective on the Dixie Valley, Nevada, hydrothermal system[J]. Geothermics, 2006, 35(1): 26-43.

- [38] 徐兴雨,王伟锋. 鄂尔多斯盆地隐性断裂识别及其控藏作用[J]. 地球科学,2020,45(5): 1754-1768.
XU X Y, WANG W F. The recognition of potential fault zone in Ordos Basin and its reservoir control[J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1754-1768.
- [39] 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 G, YANG M H, SONG L J, et al. New understanding of basement structural characteristics and its evolution process in Ordos Basin[J]. Earth Science, 2024, 49(1): 123-139.
- [40] WEISS R F. Solubility of helium and neon in water and seawater[J]. Journal of Chemical Engineering Data, 1971, 16(2): 235-241.
- [41] 王杰,贾会冲,陶成,等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区东胜气田氦气成因来源及富集规律[J]. 天然气地球科学,2023,34(4): 566-575.
WANG J, JIA H C, TAO C, et al. Source and enrichment regularity of helium in Dongsheng Gas Field of Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 566-575.
- [42] 张旗,金惟俊,李承东,等. 岩浆热场:它的基本特征及其与地热场的区别[J]. 岩石学报,2014,30(2): 341-349.
ZHANG Q, JIN W J, LI C D, et al. Magma-thermal field: Its basic characteristics, and differences with geothermal field[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 341-349.
- [43] 付金华,范立勇,刘新社,等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J]. 中国石油勘探,2019,24(4): 418-430.
FU J H, FAN L Y, LIU X S, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 418-430.

(编辑 雷雁林)

作者简介



秦江锋,西北大学地质学系教授,博士生导师。获得2012年度全国优秀博士学位论文,2014年度陕西省青年科技新星,2017年度陕西省高校首届青年杰出人才支持计划,2008和2019年两次获得陕西省科学技术一等奖(第二完成人)。取得的代表性科研成果包括:①确立了秦岭造山带晚三叠世花岗岩形成的年代学格架,提出陆壳俯冲作用与秦岭造山带晚三叠世花岗岩岩浆活动之间的关系;②初步研究峨眉大火成岩省内带中酸性岩浆岩成因,约束地幔柱背景下岩浆在岩浆房中的演化过程。目前共发表100篇学术论文,SCI收录75篇,SCI被引3 000次,其中SCI他引2 700次,单篇论文最高被SCI他引238次。