

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.003

渭河盆地固市凹陷华州北地区氦气地质条件与富集模式

周俊林¹, 李玉宏^{1,*}, 魏建设¹, 张文², 张乔¹, 韩伟¹, 马尚伟¹, 李济远³, 贺政阳¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要:氦气是重要的稀有战略资源, 广泛应用于国防工业和高技术领域, 但中国氦气供应长期依赖进口, 资源安全形势异常严峻。前人通过调查研究表明, 渭河盆地水溶氦气资源广泛分布, 富氦天然气局部富集, 并在固市凹陷南缘华州北地区地热井中发现良好富氦天然气显示, 但由于该区物探工作程度较低, 氦气富集规律与有利目标难以有效落实。为进一步查明华州北地区氦气地质条件与富集规律, 优选有利勘探目标, 近年来笔者所在团队通过地热井井口气采样测试、氦源岩调查、烃(载体气)源岩分析及储盖组合条件研究等手段, 初步建立了研究区富氦天然气成藏模式, 发现多个有利圈闭目标。综合研究认为, 华州北地区东部断背斜构造形态完整、后期构造改造弱, 富氦天然气成藏条件最为有利。该有利勘探目标的发现, 为盆地下一步氦气勘探指明了方向, 对尽快实现渭河盆地氦气资源调查突破具有重要意义。

关键词:渭河盆地; 固市凹陷; 华州北地区; 氦气; 有利区

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2022)04-0033-12

Geological Conditions and Enrichment Model of Helium in North Huazhou Area of Gushi Depression, Weihe Basin, China

ZHOU Junlin¹, LI Yuhong^{1,*}, WEI Jianshe¹, ZHANG Wen², ZHANG Qiao¹,
HAN Wei¹, MA Shangwei¹, LI Jiyuan³, HE Zhengyang¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Helium, an important rare strategic resource, has been widely used in the national defense industry and high-tech field. However, the helium supply in China heavily depends on imports, and the resource security situation is extremely severe. Previous investigations show that water-soluble helium resources are widely distributed and helium-rich gas reservoirs are locally enriched in the Weihe basin, and helium-rich gas is found in geothermal Wells in the northern part of Huazhou in the southern edge of Gushi depression. However, due to the low level of geo-

收稿日期:2022-06-10;修回日期:2022-07-06;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:吕鹏瑞

基金项目:国家重点研发计划“富氦天然气成藏机制及氦资源分布预测技术-复杂地质介质中氦气运聚及富氦气藏封盖机制研究”(2021YFA0719003)、中国地质调查局项目“全国氦气资源潜力评价与战略选区调查”(DD20221665)联合资助。

作者简介:周俊林(1986-),男,工程师,主要从事油气及非常规能源地质调查工作。E-mail:zjunlin@mail.cgs.gov.cn。

* 通讯作者:李玉宏(1968-),男,博士,正高级工程师,主要从事油气及非常规能源地质调查工作。E-mail:L1763@tom.com。

physical exploration in this area, it is difficult to reveal the helium accumulation rules and favorable exploration targets. In order to find out the geological conditions and enrichment mode of helium gas in Huazhou area and select favorable exploration targets. In recent years, our team has established a preliminary model of helium-rich natural gas accumulation and found multiple favorable trap targets in the study area, by geothermal well sampling test, helium source rock survey and analysis of carrier(gas) source rocks and reservoir caprock conditions. The comprehensive study shows that the eastern fault anticline in the north area of Huazhou has complete structure and weak structural reconstruction, and the most favorable conditions for helium rich gas accumulation. The discovery of this favorable exploration target points out the direction for the helium exploration in the Weihe basin, and is of great significance for the breakthrough of helium resource investigation in Weihe basin as soon as possible.

Keywords: Weihe basin, Gushi depression, north Huazhou area, helium, favorable area

20 世纪 70 年代,前人在渭河盆地开展石油勘探过程中,于渭深 13 井蓝田—灞河组和高陵群钻遇良好天然气显示。其中,高陵群顶部 2 644~2 654 m 砂岩段全烃异常达 0.102%~1.050%,异常值超其背景值 105 倍。通过组分分析在气体中检测出高浓度氦气,氦气含量为 2.13%~4.16%,甲烷含量为 14.08%~22.97%,氮气含量为 55.42%~74.68%。通过气层测试,该井在蓝田—灞河组发生“井喷”,气体喷出井口 7 m 多高,揭示该井深部可能存在游离气藏。但由于工程原因,试气被迫中止(国家地质总局第三普查勘探大队,1977)。由于当时勘探主要针对石油,这一发现并未引起重视。

2004 年以来,西安、咸阳等地陆续完钻多口地热井,并在井口溢出气体中检测出氦气,其含量为 0.21%~1.74%,渭河盆地氦气资源逐渐受到关注(卢进才等,2005)。此后,一些学者围绕渭河盆地氦气的成因(刘建朝等,2009;刘林等,2016;韩元红等,2022)、赋存状态(张雪等,2014;李玉宏等,2016)、分布特征(李玉宏等,2011;张春灌等,2017;李玉宏等,2018a),探测方法(冉利民,2014)和资源前景(张福礼等,2012;张林,2014;张雪,2015;张文等,2018;邹彦荣等,2021)等开展了一系列卓有成效的研究。虽然上述研究成果普遍认为渭河盆地氦气资源分布广泛,具有良好资源前景,但对于氦气资源赋存状态的认识长期存在争议。由于目前发现的富氦显示均来自于地热井井口气,且盆地内尚未钻获富氦天然气藏,因此,一些学者认为盆地氦气资源主要以水溶态的形式存在于地层孔隙-裂隙水中(刘建朝等,2009;张福礼等,2012;张雪等,2014;邹彦荣等,2021);另

一些学者通过对地热井井口气的组分特征、伴生氦气动态监测、烃类气成因、稀有气体同位素示踪等研究,认为渭河盆地不仅广泛存在水溶气资源,也存在游离态氦及伴生气资源,即具有富氦天然气藏(李玉宏等,2016;张文等,2018;Zhang et al.,2019a)。前人依托地质调查项目,通过一系列物化探工作手段和综合研究在渭河盆地圈定了华州—潼关、武功—咸阳、周至—蓝田等 3 处氦气远景区(李玉宏等,2018a),在此基础上又优选出咸渭凸起武功—兴平地区和固市凹陷华州北地区 2 个有利目标区。

渭河盆地固市凹陷华州北地区位于华州—潼关氦气远景区西部。2011 年以来,通过地热井井口气采样测试,发现华县 1、华县 2、华阴热 1 井等井口大量溢出富氦甲烷气体,显示了该区良好氦气资源前景。2013 年在该区渭参 4 井附近实施了南北向综合物化探剖面,初步发现一系列断块构造。2019 年,华州北地区的富华农邦地热井,井口气检测出富氢烃类气体,氢含量高达 5.08%。该井在未安装气水分离装置的情况下,溢出大量气体,现场取样过程中将内径 1cm 橡胶管插入井口地热水中,可持续喷出气体,且可直接点燃,样品测试甲烷含量高达 59.07%,初步推测深部存在游离天然气层。该井为简易地热井,张家坡组与蓝田—灞河组均为裸眼完井,测井资料显示该井富氦天然气体可能产自新近系中新统蓝田—灞河组底部 2 812~2 875 m 砂岩段,初步揭示该区具有良好的富氦天然气勘探潜力。2020 年,中国地质调查局西安地质调查中心在该区实施了 30 km 二维地震测量,结合 DD2013-2 综合物化探剖面,初步落实 1 个有利构造目标,进一步明

次沉积了渐新统白鹿塬组、中新统冷水沟组和寇家村组、上新统蓝田—灞河组和张家坡组、第四系秦川群等陆相地层(李智超等,2016),沉积相类型主要为冲积扇、扇三角洲、河流、湖泊相,沉积中心深度达 6 000 m 以上。其中盆地基底残留的上古生界石炭系—二叠系煤系地层和盆地内上新统张家坡组湖相泥岩是两套潜在的烃源岩。

1.2 华州北地区构造沉积特征

固市凹陷构造特征表现为东深西浅、南陡北缓的箕状断陷形态。凹陷东南侧以秦岭北缘断裂为界,西南以渭河断裂为界,北侧以口镇—关山断裂和扶风—蒲城断裂向渭北隆起过渡,沉积中心位于凹陷南侧(图 1b)。华州北地区位于固市凹陷南缘,二维地震资料解释成果揭示,该区沉积盖层与基底以秦岭北缘断裂为界,该断裂为深切基底的控盆断裂,其上发育一系列与控盆断裂走向近平行的次级断裂,剖面上表现为一系列“Y”字型组合构造样式(图 1a、图 2a、图 2c)。沉积盖层受各级断层控制,在东西方向表现为 2 个断背斜形态,背斜受到不同规模次级断层的切割,形成一系列断块、断鼻和断背斜圈闭(图 2)。

区内目前已有多口钻井,包括渭参 4 井、渭参 5 井、渭深 12 井等 3 口石油探井,以及华县 1 井、华县 2 井和富华农邦等 3 口地热井(图 2a)。其中仅华县 2 井钻遇基底,揭示的最古老沉积盖层为古近系白鹿塬组,大多数钻井仅揭示了中新统高陵群上部。根据区域地质与钻井资料,华州北地区基底岩性为太华群变质岩和印支—燕山期侵入岩。古近系为一套边缘相冲积扇沉积,岩性上部为浅棕黄色厚层状砂砾岩夹褐色薄层泥岩,中下部为厚层状棕黄色中砾岩夹褐色泥岩,厚度变化大。高陵群岩性为棕红色泥岩与灰白色粉砂岩、中细砂岩及含砾中粗砂岩不等厚互层,厚度为 267~980 m。蓝田—灞河组岩性上部为灰色泥岩与灰白色细砂岩、中砂岩等厚—不等厚互层,中下部为棕红色、棕色泥岩、砂质泥岩与灰白色含砾粗砂岩、中砂岩不等厚互层,厚度为 523~855 m。张家坡组岩性以灰绿色、棕黄色、浅灰色泥岩为主,间夹棕红色薄层泥岩及灰白色薄层中、细砂岩,为浅湖相沉积,厚度为 906~1 113 m。三门组岩性为灰黄色黏土、粉砂质黏土与灰白色含砾粗砂岩、中砂岩等厚—不等厚互层,厚度为 432~704 m(图 2b)。

2 华州北地区氦气地质条件

2.1 地热井富氦天然气显示特征

华州北地区地热井井口气氦气显示十分活跃,调查发现华县 1、华县 2、华阴热 1 井、富华农邦地热井等井口溢出气体气量大、且可以直接点燃。通过组分测试,井口气体普遍有较高含量的烃类气和氦气(表 1),数据显示气体甲烷含量为 31.89%~71.70%,且华州北部断背斜区域甲烷含量稳定在 59%以上;氦气含量为 0.54%~5.08%,均达到工业利用标准,且由南向北有增大趋势;氮气含量普遍较高,达到 25.40%~61.58%。其组分特征与世界主要富氦天然气相似,表现为富氦、高氮的甲烷气特征。

2.2 氦源岩与载体气源岩条件

大量的研究表明,世界主要富氦天然气藏均与花岗岩具有空间配置关系,如美国潘汉德—胡果顿(Panhandle-Hugoton)气田、阿尔及利亚哈希鲁迈勒(Hassi R'Mel)气田、中国四川威远气田(Brown,2010;陈践发等,2022)。目前普遍认为盆地基底富铀、钍花岗岩类是富氦天然气藏的主要氦源岩,盆地内各类沉积岩是氦源的重要补充(李玉宏等,2022;秦胜飞等,2022)。固市凹陷南缘大面积分布印支—燕山期花岗岩(李玉宏,2018a;张文,2019),华州北地区南缘毗邻老牛山复式岩体,且华县 2 井在 2 609 m 钻遇花岗岩基底(图 3)。

老牛山岩体分为印支期(217~223 Ma)和燕山期(149~151 Ma),前者以似斑状中粒黑云二长花岗岩、似斑状中细粒角闪石英二长岩为主,后者以似斑状中粗粒黑云二长花岗岩为主(表 2)。该复式岩体中 Th、U 以副矿物形式存在于岩石主要矿物(石英、长石、黑云母、角闪石)中及矿物颗粒间或相互包裹,矿物组合主要有锆石、榍石、磷灰石、褐帘石,其次为钍石、Nb—Ta—U 矿物。印支期普遍具有更高含量的 Th 元素,以褐帘石的缺失及更多的钍石为特征。通过对老牛山岩体花岗岩 U、Th 元素丰度的测试(表 2),印支期岩体 U 含量为 2.32×10^{-6} ~ 10.90×10^{-6} ,平均为 4.75×10^{-6} ;Th 元素丰度 12.2×10^{-6} ~ 45.9×10^{-6} ,平均为 25.1×10^{-6} ,单位质量岩石平均生氦速率为 $12.74 \times 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{a}$;燕山期岩体 U 含量为 1.93×10^{-6} ~ 2.78×10^{-6} ,平

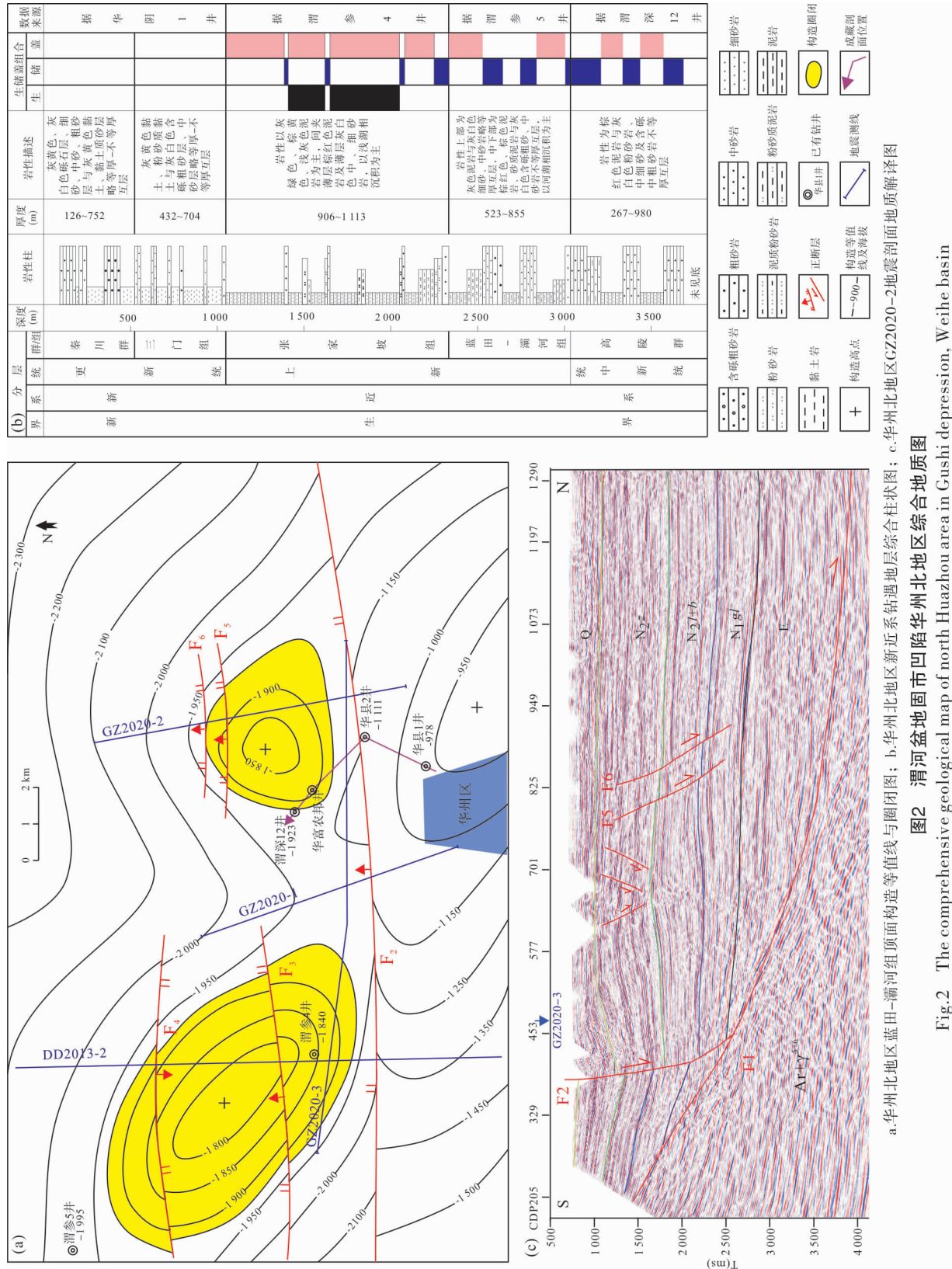


图2 渭河盆地固市凹陷华州北地区综合地质图

Fig.2 The comprehensive geological map of north Huazhou area in Gushi depression, Weihe basin

表 1 固市凹陷华州北地区地热井井口气组分分析数据表

Tab. 1 The analysis data table of gas components of geothermal wells in north Huazhou area of Gushi depression

序号	井名	地区	甲烷(%)	乙烷(%)	全烃(%)	氦气(%)	氢气(%)	氮气(%)	CO ₂ (%)	δ ¹³ C _{CH₄} (‰)
1	华县 1	华州	60.05	0.49	60.61	0.54	—	38.81	0.04	—30.59
2	华县 2	华州	71.70	0.57	72.38	2.11	—	25.40	0.03	—33.47
3	富华农邦	华州	59.07	0.32	59.47	5.08	1.56	33.09	0.71	
4	华阴热 1 井	华阴	31.89	0.34	32.38	3.01	0.79	61.58	2.24	

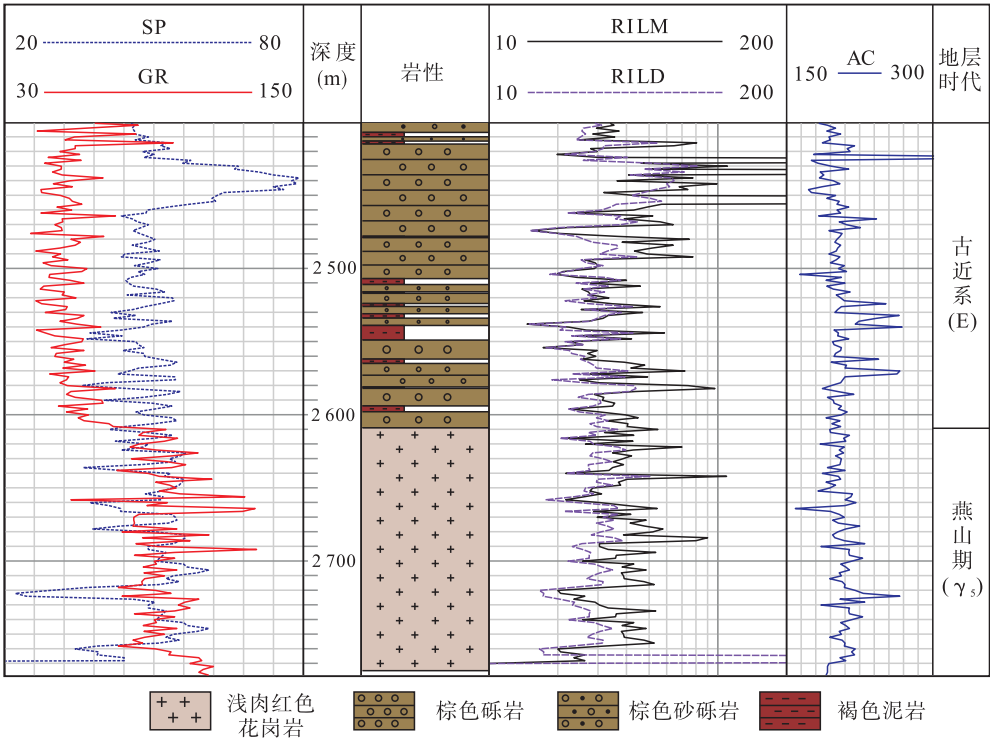


图 3 华县 2 井底部地层柱状图

Fig. 3 The formation histogram at the bottom of Huaxian 2 well

均为 2.32×10^{-6} ; Th 元素丰度为 $8.2 \times 10^{-6} \sim 16.7 \times 10^{-6}$, 平均为 12.6×10^{-6} m, 单位质量岩石平均生氮速率为 6.42×10^{-13} $\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{a}$ 。由此可见, 印支期岩体生氮潜力优于燕山期岩体, 且总体生氮速率均高于地壳平均值, 显示出该地区良好的氮源岩条件。

全球范围内尚未发现独立的氦气藏或者以氦气为主要成分的气藏, 氦气多以伴生组分赋存于烃类、氮气或者二氧化碳为主成分的天然气藏中, 烃类气体、氮气等在氦气富集过程中充当了运移的载体(李玉宏等, 2022)。华州北地区井口气甲烷含量稳定在 59% 以上, 通过对华县 1 井、华县 2 井井口气甲烷碳同位素测试, 显示该区甲烷碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) 为

—33.47‰~—30.59‰, 揭示载体气可能来自于上古生界煤系地层。二维地震资料解释成果揭示凹陷基底存在上古生界煤系烃源岩(李玉宏, 2018a, 2018b)。前人调查研究成果显示, 固市凹陷基底仍有大范围的石炭系—二叠系残留(王建强, 2010)。因此, 认为本区具有载体气源岩基础。

2.3 储盖组合条件

华州北地区新近系各层系厚度稳定, 张家坡组为一套浅湖相泥岩、薄砂岩互层, 厚度近千米, 封盖条件良好, 蓝田—灞河组和高陵群为冲积扇、河流相砂泥岩互层, 储盖组合空间配置好, 易形成岩性圈闭。蓝田—灞河组与高陵群砂体发育, 厚度为 1.5~60 m 不等, 储层性能优异(图 4)。

表 2 老牛山岩体花岗岩 Th、U 丰度与生氦速率数据表
Tab. 2 The Th and U abundance and helium generation rate data of Laoniushan granites

样品编号	岩性	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	岩体年龄(Ma)	生氦速率(10 ⁻¹³ cm ³ /g·a)
20SD-B1	似斑状中粗粒黑云 二长花岗岩	2.78	16.7	149	8.16
20SD-B3		2.24	12.9		6.43
20SD-B4		1.93	8.2		4.67
20SD-B6	中粒角闪石英 二长岩	3.68	13.8	217	8.39
20SD-B8		4.57	15.40		9.93
20SD-B10		10.9	12.2		16.56
20SD-B12		3.15	23.9		10.69
20SD-B13		5.54	45.9		19.92
20SD-B15		8.47	19.2		15.69
20SD-B16		3.62	26.0		11.85
20SD-B17		2.6	37.0		13.82
20SD-B18		2.49	22.0		9.34
20SD-B20		4.67	28.5		13.85
20SD-B21		2.32	18.7		8.18
20SD-B23		2.82	38.9		14.64
地壳平均		3.0	13.0		

区内钻遇目标层系的钻井有渭参 4、渭参 5、渭深 12 井等。以渭参 4 井为例高陵群单层砂岩平均厚度为 2.5 m,最厚达 16 m,储层物性较好,平均孔隙度为 8.12%,渗透率差异较大,平均值为 $9.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储集性能良好(表 3);蓝田—灞河组岩性组合及沉积相特征与高陵群类似,下部砂体发育,单砂层厚度一般在 1.5 m,最厚达 60 m。孔隙度为 6.55%~8.12%,平均为 7.56%;渗透率变化较大,为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 12.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $8.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 3);2 套储层孔隙度、渗透率均达到良好或以上,储集性能较好。张家坡组底部发育浅灰色砂岩与灰绿色泥岩互层,储集性能稍差,虽然张家坡组储集性较差,但张家坡组厚层泥岩可作为下部高陵群和蓝田—灞河组的区域盖层,形成多套优异的储盖组合。

2.4 构造与圈闭特征

二维地震资料解释成果揭示,华州北西部地区构造整体表现为受控盆正断层控制的 2 个逆牵引背斜,其在东西方向上存在明显差异。西部 DD2013-P2 剖面揭示其南部是受多条次级断层切割的逆牵引背斜构造,控盆断层与次级断层在剖面上组合成一系列

“Y”字型组合样式,平面上表现为一系列断背斜、断鼻和断块构造(图 1b)。东部 GZ2020-2 剖面则呈现为一个受控盆断层控制的逆牵引背斜,构造幅度弱于西部地区,背斜相对平缓,后期断层改造也弱于西部地区,背斜鞍部张家坡组内部发育 3 条小断层,背斜北部 2 条次级断层切入高陵群,但整体而言,圈闭未受到大规模破坏(图 2c)。东西方向上的 GZ2020-3 剖面也揭示了东部地区低幅度断背斜的存在,整体幅度较小,西部地区则存在断层破坏(图 5)。综合对比来看,西部背斜幅度大,构造改造强,背斜鞍部被多条次级断层切穿,保存条件受到一定程度破坏。东部断背斜构造形态完整,背斜两翼表现为南陡、北缓的不对称形态,背斜鞍部在垂向上发生迁移,由下而上滚动幅度变大,鞍部向南迁移(图 1b、图 2a、图 2c、图 5)。通过综合研究,认为华州北东部断背斜形态完整,后期改造弱,富氢天然气成藏条件好。

3 氦气富集模式

3.1 氦气与地下水的关系

稀有气体同位素是示踪地下流体运移和富集过

程的重要手段(Ballentine et al.,2002)。地质流体中²⁰Ne 只有空气来源,其随空气溶解于原始地层水或者溶入地表水运移到地下,²⁰Ne 在地层水中的初始含量是可以准确测定的。由于 He 和 Ne 在水相

和油相中有相似的亨利系数(Ballentine et al.,2002),二者在不同相之间的交换不会造成较大的元素分馏,因此⁴He/²⁰Ne 是示踪氦气富集和地下水运移的良好参数(张文,2019)。

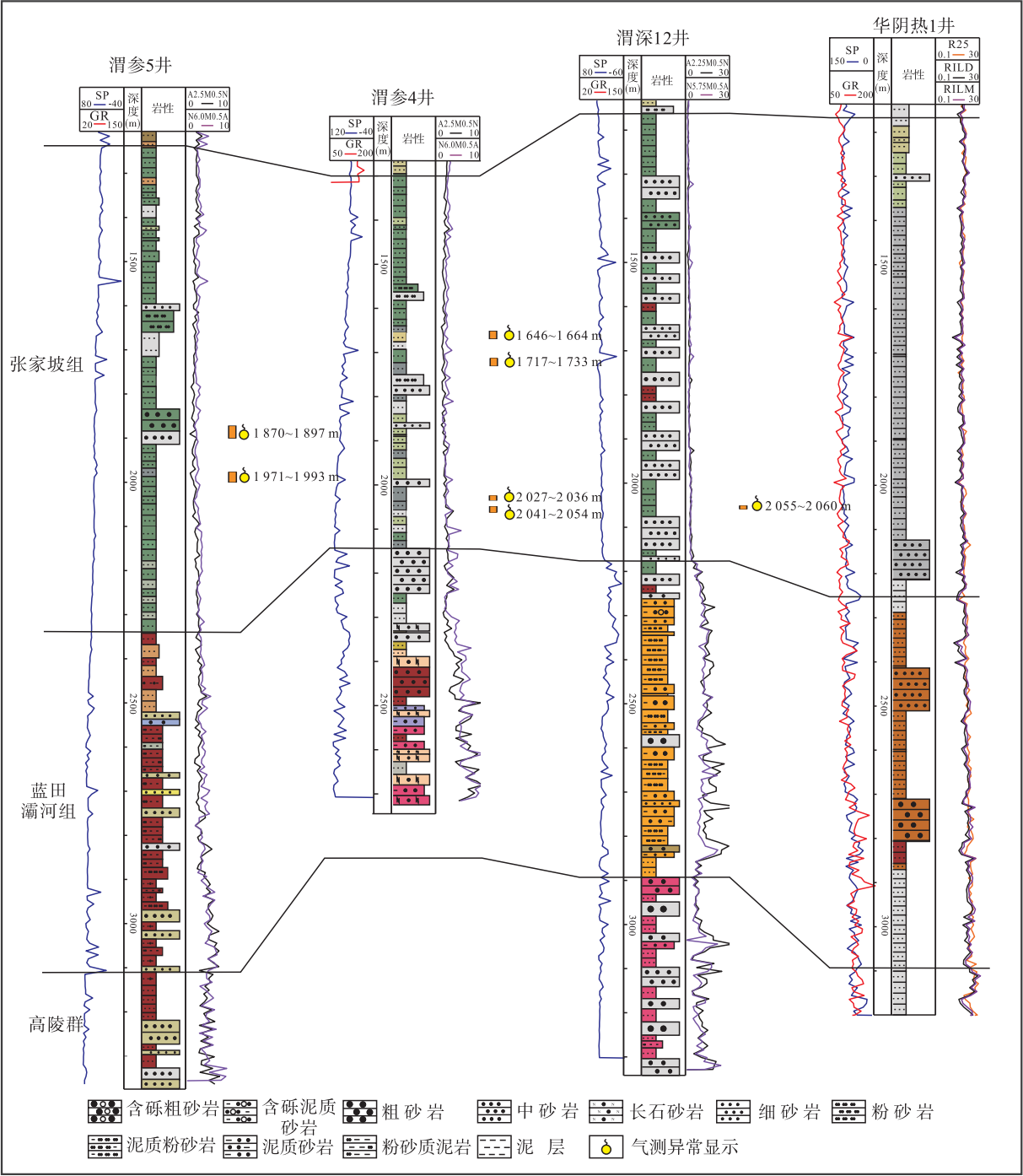


图 4 渭参 5 井-渭参 4 井-渭深 12 井-华阴热 1 井地层对比柱状图

Fig. 4 The histogram of formation correlation of Wells Weican5-Weican4-Weishen12-Huayinre1

表 3 渭参 4 井储层综合数据表
Tab. 3 The comprehensive reservoir data table of the Weican 4

层位	孔隙度(%)		渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)		砂岩层数	单砂岩厚度(m)	
	范围	平均	范围	平均		范围	一般
蓝田—灞河组	6.55~8.12	7.56	1.00~12.35	8.5	54	1.0~2.0	1.5
高陵群	7.94~8.29	8.12	2.00~16.63	9.3	118	1.0~6.0	2.5

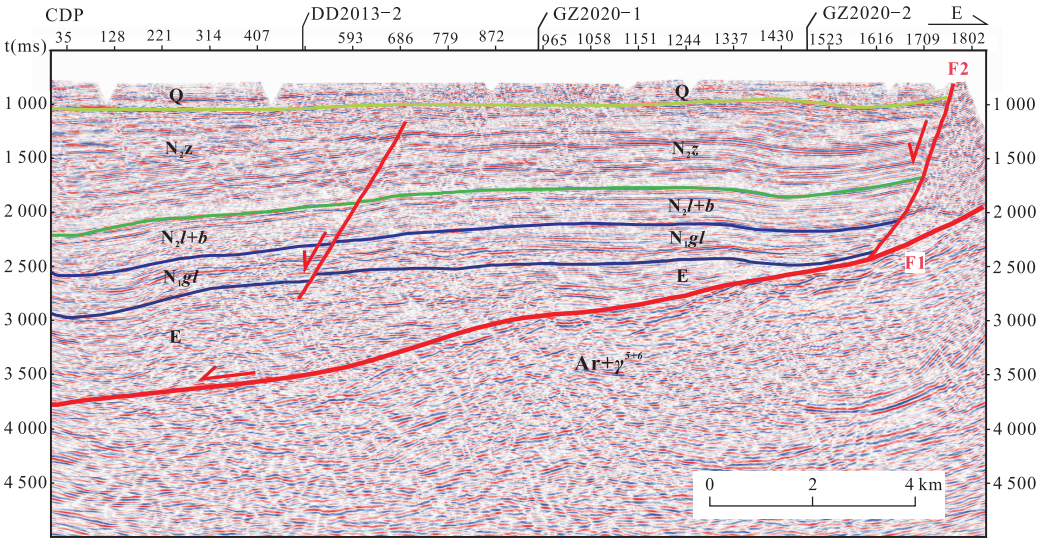


图 5 华州北地区 GZ2020-3 地震剖面地质解译图(剖面位置见图 2a)
Fig. 5 The geological interpretation of GZ2020-3 seismic profile in northern Huazhou area
(The section location is shown in Fig. 2a)

Zhang 等(2019a)对渭河盆地 10 口地热井井口气样品开展了稀有同位素研究研究,研究显示华县 2 井的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值(37 164)显著高于其他样品值。笔者将华县 2 井样品 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值与美国潘汉德-胡果顿气田和柴达木盆地东坪、马北气田等典型富氦天然气样品进行了对比(图 6),潘汉德-胡果顿气田 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值为 24 871~46 023(Ballentine et al., 2002;Danabalan,2017),柴达木盆地东坪、马北气田样品 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值为 38 373~78 190(张文,2019;Zhang et al.,2019b),华县 2 井样品显示出典型富氦天然气的特征。另一方面该数值说明华县附近的 ^4He 通量高或地下水流速低(张文,2019)。华州北地区靠近秦岭南缘的富铀钍的华山花岗岩体,前文测算的南缘老牛山花岗岩生氦速率显著高于地壳平均值,华州北地区的深部 ^4He 通量具有高异常特征。由于地下水广泛分布在地质体中,且氦气因在地质环境中低丰度而不太可能形成单独流体进行运移(Ballentine et al., 2002)。因此,笔者认为地层孔隙—裂隙水是华州北

地区氦气运移和富集的重要载体。

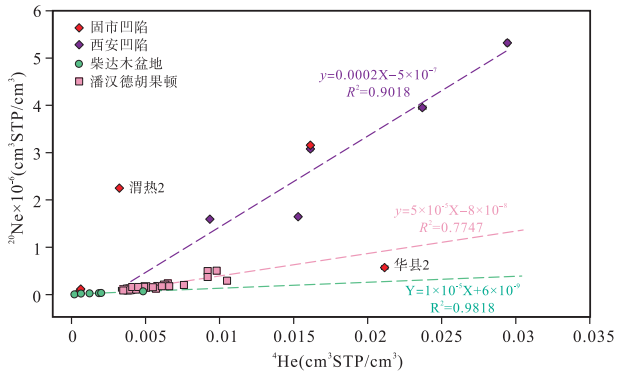


图 6 渭河盆地井口气样品 ^4He 与 ^{20}Ne 关系图
Fig. 6 The relationship diagram between ^4He and ^{20}Ne of well breath samples in Weihe Basin

3.2 华州北地区氦气富集模式

根据渭河盆地地热井井口气体样品的稀有气体同位素测试和示踪研究,前人初步建立了渭河盆地富氦天然气成藏模式:①空气来源的稀有气体溶解到原

始地层水或者表水中并随之运移至地下。②壳源气体(^4He , $^{40}\text{Ar}^*$ 等)从岩石中释放出来并溶解到地下水中。③地下水经历了油—水分馏。④主要气体组分(N_2 和 CH_4)加入到盆地地下流体系统中。随着甲烷补给量的增高,依次形成高氮弱气水溶气、低氮强气水溶气和高氮游离气藏。在游离气藏处,持续的水—气平衡导致溶解度极低的氦气不断脱溶进入天然气中并富集。研究表明华州北地区存在游离气藏,且 He 通量高,是渭河盆地富氮天然气成藏的有利目标区之一(Zhang et al., 2019a; 张文, 2019)。

根据上述研究成果,结合华州北地区地质认识,笔者初步建立了华州北地区富氮天然气成藏模式(图 7):①大气来源的 ^{20}Ne 溶解到原始地层水或者地表水中沿着控盆断裂及地层孔隙运移,并形成稳定的循环系统。②固市凹陷深部残留的石炭系—二叠系煤系地层形成煤型甲烷气并沿着断层和地层孔

隙向浅部低势区运移。③基底富铀、钍花岗岩放射性衰变产生 ^4He 并向地壳浅部扩散。④煤型甲烷气等气体沿着断层、孔隙向上运移过程中不断从裂隙、孔隙水中脱溶放射性成因 ^4He , 游离气泡中氦气浓度不断升高。⑤浅部补给水向下运移与深部向上运移的富氮高氮甲烷气泡在深部相遇并充分混合溶解,在高陵群、蓝田—灞河组砂体中运移,并在局部构造高点形成游离气藏。⑥在游离气藏处,持续的水—气平衡导致溶解度极低的氦气不断脱溶进入天然气中并富集。⑦浅部张家坡组生物气藏为近源成藏,甲烷运移距离短,未能在运移过程中脱溶大量氦气,地层水运移也并不活跃,因此形成低氮甲烷气藏(图 7)。华县 2 井之后完钻的富华农邦地热井含氮高、承压下气量较大,若改变现在的裸眼完井为套管完井,根据新生界良好的物性,有可能获得较高的产气量,具有较好氦气资源前景。

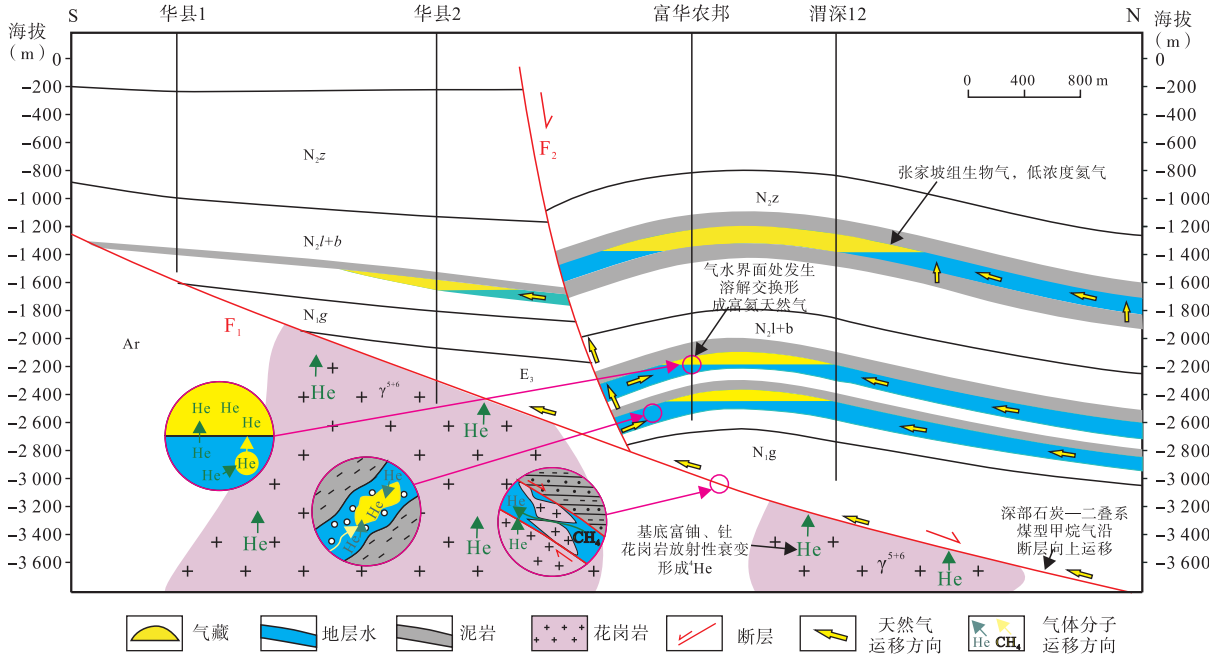


图 7 华州北地区富氮天然气成藏模式(剖面位置见图 2a)

Fig. 7 The helium accumulation model in northern Huazhou area(Section location is shown in Fig. 2a)

4 结论

(1)华州北地区氮源岩和载体气(烃类)源岩条件、运移通道、储盖组合发育良好,二维地震成果揭示该区蓝田—灞河组、高陵群存在良好构造圈闭,储集层主要为河流相砂岩,可能发育岩性圈闭。华州

北地区东部发育低幅度断背斜构造,且后期构造改造弱,张家坡组湖相泥岩厚度大,保存条件相对优越,富氮天然气成藏条件好。地热井广泛的富氮天然气显示,表明华州北地区有望率先实现渭河盆地氦气资源调查突破。

(2)地质调查与稀有气体同位素示踪表明,渭河盆地水溶气广泛发育,富氮天然气藏局部富集。华

县2井井口气极高 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值表明该区 ^4He 通量高,且与全球典型富氦天然气具有相似的组分和稀有气体同位素特征,揭示华州北地区大量的 CH_4 和 N_2 使地下水饱和,并在局部构造高点形成游离气藏。富氦溶解气随着地下水和游离气泡运移,并与气藏底部持续接触,导致氦气在气水界面处不断脱溶进入天然气藏中,并富集形成富氦天然气藏。

参考文献(References):

陈践发,刘凯旋,董勃伟,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 Jianfa, LIU Kaixuan, DONG Qingwei, 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.

国家地质总局第三普查勘探大队. 汾渭盆地石油普查阶段地质成果报告[R]. 1977.

韩元红,罗厚勇,薛宇泽,等. 渭河盆地地热水伴生天然气成因及氦气富集机理[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(02): 277-287.

HAN Yuanhong, LUO Houyong, XUE Yuze, et al. Genesis and helium enrichment mechanism of geothermal water associated gas in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(02): 277-287.

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(S1): 47-53.

LI Yuhong, LU Jincal, 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.

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, Shaanxi Province and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2-3): 372-378.

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, 2018a.

LI Yuhong, ZHOU Junlin, ZHANG Wen, et al. Helium Accumulation Conditions and Resource Prospects in the Weihe Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018a.

李玉宏,张文,袁炳强,等. 渭河新生代盆地基底组成及其油气地质意义[J]. 西安科技大学学报, 2018b, 38(6): 39-47.

LI Yuhong, ZHANG Wen, YUAN Bingqiang, et al. Basement composition for Weihe Cenozoic Basin and its petroleum geological significance[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018b, 38(6): 39-47.

李玉宏,李济远,周俊林,等. 氦气资源评价相关问题认识与进展[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(2): 1-11.

LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Research progress and new views on evaluation of helium resources [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(2): 1-11.

李智超,李文厚,李永项,等. 陕西渭河地区新生代地层及沉积环境演化[J]. 地层学杂志, 2016, 40(02): 168-178.

LI Zhichao, LI Wenhou, LI Yongxiang, et al. Cenozoic stratigraphy and paleoenvironments in the Weihe area, Shaanxi Province[J]. Journal of Stratigraphy, 2016, 40(2), 168-179.

李兆雨,李永项,李文厚,等. 汾渭盆地古近系一新近系沉积特征[J]. 地质科学, 2021, 56(04): 1120-1133.

LI Zhaoyu, LI Yongxiang, LI Wenhou, et al. Sedimentary characteristics of Paleogene-Neogene in Fenwei Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(04): 1120-1133.

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(06): 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(06): 84-88.

刘林,芮会超,陈宝赞. 渭河盆地天然气类型、成因特征及找矿远景分析[J]. 地质力学学报, 2016, 22(02): 256-268.

LIU Lin, RUI Huichao, CHEN Baoyun. The Characteristics and types of the natural gas in the Weihe Basin and its prospecting potential[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(02): 256-268.

卢进才,魏仙样,李玉宏,等. 汾渭盆地富氦天然气成因及成藏条件初探[J]. 西北地质, 2005, 38(03): 82-86.

LU Jincal, WEI Xianyang, LI Yuhong, et al. Preliminary study about genesis and pool formation conditions of rich-helium type natural gas[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(03): 82-86.

秦胜飞,李济远,梁传国,等. 中国中西部富氦气藏氦气富集机理—古老地层水脱氮富集[J/OL]. 天然气地球科学. 2022: 1-17. DOI:10.11764/j.issn.1672-1926.2022.03.015

QIN Shengfei, LI Jiyuan, LIANG Chuanguo, et al. Helium enrichment mechanism of helium rich gas reservoirs in central and western China-degassing and accumulation from old formation water[J/OL]. Natural Gas Geoscience. 2022: 1-17. DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2022.03.015

- 冉利民. 渭河盆地水溶氦气测井识别方法及解释标准[J]. 测井技术, 2014, 38(06): 760-764.
- RAN Limin. Log identification methods and interpretation criteria of water soluble helium in WeiHe Basin[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(06): 760-764.
- 王建强. 鄂尔多斯盆地南部中新世代演化—改造及盆山耦合关系[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- WANG Jianqiang. Mesozoic-Cenozoic Basin of Evolution-Reforming and Basin-Mountain Couping in Southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- 王建强, 刘池洋, 高飞, 等. 陕西渭河盆地前新生代地质特征及其油气意义[J]. 地质通报, 2015, 34(10): 1981-1991.
- WANG Jianqiang, LIU Chiyang, GAO Fei, et al. Pre-Cenozoic geological characteristics and oil-gas significance in Weihe basin, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(10): 1981-1991.
- 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, YUAN 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.
- 张福礼, 孙启邦, 王行运, 等. 渭河盆地水溶氦气资源评价[J]. 地质力学学报, 2012, 18(02): 195-202.
- ZHANG Fuli, SUN Qibang, WANG Xingyun, et al. Evaluation of water soluble helium resources in Weihe Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18(02): 195-202.
- 张林. 渭河盆地地热及伴生水溶气资源探索及远景预测[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- ZHANG Lin. Exploration and Prospect Prediction of Geothermal and Associated Water Soluble Gas Resources in Weihe Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- 张文, 李玉宏, 王利, 等. 渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(02): 236-244.
- ZHANG Wen, LI Yuhong, WANG Li, et al. The analysis of helium accumulation conditions and prediction of helium resource in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(02): 236-244.
- 张文, 关中和柴北缘地区战略性氦气资源成藏机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- ZHANG Wen. Production, release and accumulation of helium, a strategic resource, in Guanzhong Basin and North Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2019.
- 张雪, 刘建朝, 李荣西, 等. 渭河盆地地热水溶气资源分布规律[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(03): 392-399.
- ZHANG Xue, LIU Jianchao, LI Rongxi, et al. The distribution of gas soluble in geothermal water in Weihe Basin[J]. Contributions To Geology And Mineral Resources Research, 2014, 29(03): 392-399.
- 张雪. 渭河盆地天然气及氦气成藏条件与资源量预测[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- ZHANG Xue. Accumulation Conditions and Resource Prediction of Natural Gas and Helium in Weihe Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- 邹彦荣, 张瑾, 刘隽民, 等. 咸阳地热田水溶氦气资源评价与开发利用前景分析[J]. 城市地质, 2021, 16(03): 301-308.
- ZOU Yanrong, ZHANG Jin, LIU Dimin et al. Evaluation and development prospects of water-soluble helium resource in Xianyang Geothermal Field[J]. Urban Geology, 2021, 16(03): 301-308.
- 张岳桥, 施炜, 董树文. 华北新构造: 印欧碰撞远场效应与太平洋俯冲地幔上涌之间的相互作用[J]. 地质学报, 2019, 93(05): 971-1001.
- ZHANG Yueqiao, SHI Wei, DONG Shuwen. Neotectonics of North China: Interplay between far-field effects of India-European collision and Pacific subduction related deep-seated mantle up welling[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(05): 971-1001.
- Ballentine C J, Burnard P G. Production, Release and Transport of Noble Gases in the Continental Crust[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47(1): 481-538.
- Ballentine C J, Burgess R, Marty B. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust[J]. Reviews in mineralogy and geochemistry, 2002, 47(1): 539-614.
- Ballentine C J, Lollar B S. Regional groundwater focusing of nitrogen and noble gases into the Hugoton-Panhandle giant gas field, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(14): 2483-2497.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[C]. AAPG Convention, New Orleans, Louisiana, USA, 2010.
- Danabalan D. Helium: Exploration Methodology for A Strategic Resource[D]. Durham: Durham University, 2017.
- Rao G, Lin, A M, Yan B, et al. Tectonic activity and structural features of intracontinental active normal faults in the Weihe Graben, central China[J]. Tectonophysics, 2014, 636: 270-285.
- Shi W, Dong S W, Hua J M. Neotectonics around the Ordos Block, North China: A review and new insights[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 200: 102969.
- Zhang W, Li Y, Zhao F, et al. Using noble gases to trace groundwater evolution and assess helium accumulation in Weihe Basin, central China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019a, 251: 229-246.
- Zhang W, Li Y, Zhao F, et al. Quantifying the helium and hydrocarbon accumulation processes using noble gases in the North Qaidam Basin, China[J]. Chemical Geology, 2019b, 525: 368-379.