

DOI: 10.12401/j.nwg.2022039

临汾-运城盆地氦气富集要素及成藏条件

司庆红^{1,2,3}, 曾威^{1,2,3,*}, 刘行^{1,2,3}, 胡少华⁴, 张超^{1,2,3}, 王佳营^{1,2,3}, 黄忠峰^{1,2,3}, 何鹏^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170; 3. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170; 4. 山西省第三地质工程勘察院, 山西 晋中 030620)

摘要: 为认识临汾-运城盆地氦气资源前景, 促进氦气勘查工作, 笔者根据地球物理资料、元素地球化学实验及构造资料, 分析了临汾-运城盆地氦源岩分布和氦气运移通道条件; 在收集和整理临汾-运城盆地前新生界地热、气测录井及物探资料的基础上, 开展了以地热和煤系气为主的氦载体特征研究。研究发现: ①临汾-运城盆地具备地幔物质上涌和本溪组铝土岩系 2 种氦源条件。②控制盆地和凹陷的深大断裂贯通了深部氦源与前新生代地层, 盆地内发育的正断层在很大程度上可提高前新生界各地层间的连通性, 有良好的运移通道。③临汾-洪洞地区石炭系—二叠系具有优越的煤系气成藏条件。综合氦源岩分布、氦气运移通道、氦载体和保存等氦气成藏条件, 认为临汾-运城盆地中奥陶统马家沟组为主要富氦地热储层, 且临汾-洪洞地区太原组和山西组具备富氦煤系气的找矿前景。

关键词: 临汾-运城盆地; 氦气; 前新生界; 成藏条件; 煤系气; 地热

中图分类号: P618.3; TE122

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0129-13

Analysis of Helium Enrichment Factors and Reservoir Forming Conditions in Linfen-Yuncheng Basin

SI Qinghong^{1,2,3}, ZENG Wei^{1,2,3,*}, LIU Xing^{1,2,3}, HU Shaohua⁴, ZHANG Chao^{1,2,3},
WANG Jiaying^{1,2,3}, HUANG Zhongfeng^{1,2,3}, HE Peng^{1,2,3}

(1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 3. Key Laboratory of Uranium Geology of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. The Third Institute of Geological Engineering Reconnaissance, Jinzhong 030620, Shanxi, China)

Abstract: In order to promote the helium exploration and deepen the understanding of helium accumulation theory, the distribution of helium source rocks and the conditions of helium migration channels in Linfen-Yuncheng basin has been analyzed with regional aeromagnetic interpretation data, element geochemical experiments and tectonic evolution data. Then, the study on the characteristics of helium carrier reservoir dominated by geothermal and resources has been carried out by collecting geothermal, gas survey and geophysical exploration data. The main results are as follows: ① There are two Helium source conditions, which are mantle upwelling and bauxite series in Benxi Formation. ② The deep faults controlling the basin and depression have

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-10-22; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“渤海湾盆地氦气资源调查评价”(DD20221668)资助成果。

作者简介: 司庆红(1986-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿田构造及地质矿产调查。E-mail: sqinghongcgs@163.com。

* 通讯作者: 曾威(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产地质调查。E-mail: 314818431@qq.com。

connected the deep helium source and the pre-Cenozoic strata. The normal faults developed in the basin have greatly improved the connectivity between the pre-Cenozoic strata. They provide good channels for helium migration. ③ The geological conditions of hydrocarbon generation and accumulation of coal measure gas in the Permo-carboniferous system in Linfen and Hongdong areas are superior. Based on helium source, transportation, carrier and other enrichment factors, it is considered that Majiagou Formation of Middle Ordovician in Linfen-Yuncheng Basin is a main helium rich geothermal reservoir. In addition, the prospecting prospect of helium rich coal measure gas of Shanxi Formation and Taiyuan Formation in Linfen and Hongdong areas is broad.

Keywords: Linfen-Yuncheng basin; helium; pre-Cenozoic; reservoir forming conditions; coal measure gas; geothermal

氦气是广泛应用于航天、医疗、核工业、军工等国家安全和高技术领域的战略性稀有资源(李玉宏等, 2022)。目前,在中国西部的塔里木盆地、柴达木盆地,中部的四川盆地、鄂尔多斯盆地,东部的海拉尔盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地等有富氦天然气藏的发现,在渭河盆地、山西中南部断陷盆地有水溶性氦气资源的发现(柴先平, 2007; 李玉宏等, 2017a, 2017b; 李济远等, 2022; 张乔等, 2022)。中国虽然在部分地区发现一定量的氦气资源,但氦气资源整体勘探程度低,氦气成藏机理和资源潜力尚不明晰。开展氦气成藏要素分析有助于深入认识氦气成藏规律,对深化氦气成藏理论和促进氦气找矿发现具有科学理论和找矿发现的双重意义。

前人对渭河盆地(薛华锋等, 2004; 卢进才, 2005; 柴先平, 2007; 李玉宏等, 2011; 张福礼等, 2012)、四川威远气田(徐永昌等, 1989; 封万芳, 1989; 陈文正, 1992; 戴金星, 2003)及塔里木盆地(常兴浩等, 1997; 王招明等, 2007; 余琪祥等, 2013)等富氦盆地开展了系列氦气成藏研究工作,取得了重要进展。例如,渭河盆地壳源氦气弱源成藏模式(李玉宏等, 2017a),松辽盆地北部壳幔混合源氦气主要受控于盆内深大断裂(冯子辉等, 2001),云南腾冲温泉气中幔源氦的形成主要取决于火山区和地幔的连通(王先彬等, 1992)。尽管不同盆地氦气资源禀赋条件和控制因素不尽相同,但众多学者对氦气成藏取决于氦源、运移、储集和保存等4个方面成藏要素的认识已达成共识(陈文正, 1992; 戴金星, 2003; 卢进才, 2005; 柴先平, 2007)。

临汾-运城盆地与富氦资源的渭河盆地(李玉宏等, 2011)、鄂尔多斯盆地东缘石西区块(刘超等, 2021)和晋中地区(李济远等, 2022)毗邻,而He丰度通常具有很强构造区域性(徐永昌, 1997; 徐永昌等, 2003),

临汾-运城盆地也可能是氦气资源富集地区。

临汾-运城盆地的地热主要储集在寒武系、奥陶系,二叠系有明显的煤系气显示,有良好的储盖层组合(张海永, 2016; 郝少伟, 2020; 李海泉等, 2020; 杨洪雨, 2020)。因此,临汾-运城盆地前新生界地热及煤系气是氦气成藏的主要潜在载体(以下称氦载体)。

前人针对临汾-运城盆地前新生界开展了大量的研究工作,取得地热、煤系气资源分布及成因的显著进展,也积累了丰富的基础地质资料。近年来,有关地质勘查工作加大了对临汾-运城盆地氦气资源的关注,在区内发现了高氦气含量地热井,氦气含量最高达到7%以上(据山西省第三地质工程勘察院内部资料),显示出区内具有丰富的氦气资源前景。然而,目前关于该地区氦气的相关研究还很少,对氦气来源、运移、储集和保存等成藏要素的相关研究还十分薄弱。笔者以氦气来源、运移通道、氦载体等成藏要素为主线,开展氦气富集因素及成藏条件分析,并为后续氦气找矿工作提出建议。

1 区域地质背景

临汾-运城盆地位于山西地堑系南部,其东侧为霍山-浮山隆起带,西与吕梁山隆起带相连,东南界为北北东向展布的中条山山前大断裂。临汾-运城盆地自北而南进一步分为霍州台地、临汾凹陷、塔尔山凹陷、侯马凹陷、稷王山凹陷、河津凹陷、峨嵋台地、运城凹陷8个次级构造单元(图1a)。在盆地塔儿山、稷王山及盆缘隆起区分布有大量幔偏碱性-碱性多期次侵入杂岩体群,多为地下隐伏,露头岩体较少,侵入层位可至三叠系(郭景林等, 2010; 王二文, 2010),岩浆作用时间与华北地区早白垩世构造转换、岩石圈减薄及深部岩浆底侵等事件一致(祁凯, 2021)。

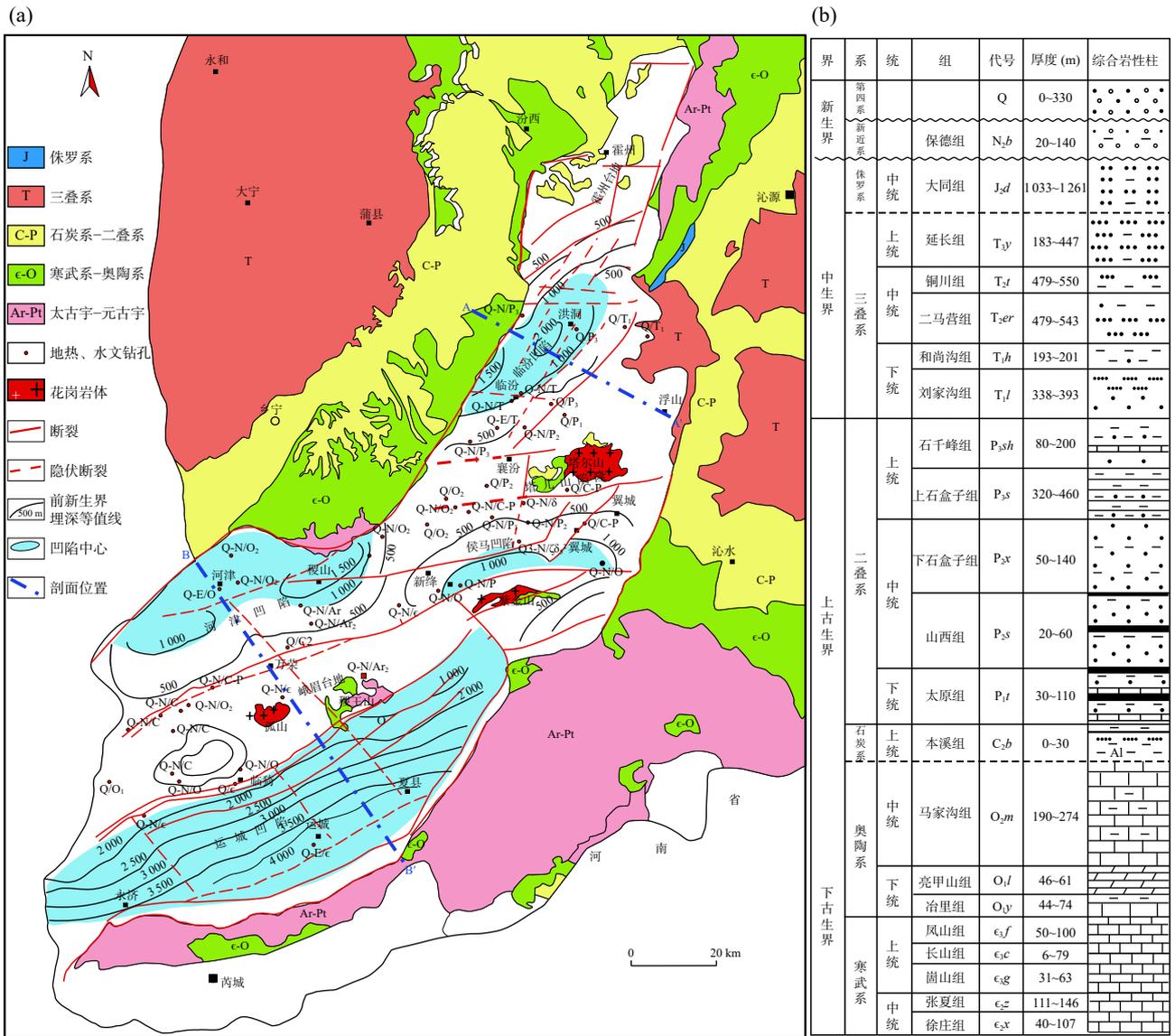


图 1 临汾-运城盆地地层组合及构造纲要图(据李自红等, 2014; 芦建军, 2015; 赵俊峰等, 2019; 韩勇, 2021 修改)

Fig. 1 The geological map of the structure and stratigraphic assemblage of the Linfen-Yuncheng basin

临汾-运城盆地前新生界沉积地层组合如下: 下古生界发育寒武系和奥陶系碳酸盐岩; 上古生界主要发育本溪组(C_{2b})、太原组(P_{1t})、山西组(P_{2s})、下石盒子组(P_{2x})、上石盒子组(P_{3s})和石千峰组(P_{3sh}); 三叠系与古生界不存在沉积间断, 主要发育刘家沟组(T_{1l})、和尚沟组(T_{1h})、二马营组(T_{2er})、铜川组(T_{2t})和延长组(T_{3y})(图 1b)。临汾-运城盆地在三叠纪前经历了与鄂尔多斯盆地相似的演化过程(孙国凡等, 1985; 刘绍龙, 1986; 程守田等, 1997; 王双明等, 1999; 赵文智等, 2006; 刘池洋, 2007; 杨明慧等, 2012; 芦建军, 2015; 赵俊峰等, 2019), 由于受到印支期(T₃末)、燕山中-晚期(J₃、K₂)和喜山期(E_{1,3}~N₁)多期改造的

影响, 盆地侏罗系下伏地层遭受不均匀剥蚀。盆地南部新生界下伏基岩地层以寒武系-奥陶系为主, 其次为石炭系-二叠系; 盆地北部新生界下伏基岩以石炭系-二叠系为主, 其次为中-下三叠统(芦建军, 2015; 赵俊峰等, 2019)。

临汾-运城盆地前新生界顶部埋深为 500~2 500 m, 总体呈南深北浅的特点(图 1a)。前新生界顶面在霍州台地最大埋深为 1 200 m, 在临汾凹陷埋深为 500~2 000 m, 在塔儿山隆起区埋深为 200~600 m, 在侯马凹陷埋深超过 1 000 m, 在河津凹陷埋深为 600~2 500 m, 在稷王山陷隆最大埋深为 1 500 m, 在峨嵋台地埋深为 400 m 以浅, 在运城凹陷最大埋深为

4 000 m(芦建军, 2015; 赵俊峰等, 2019)。

2 氦源条件

2.1 幔源氦

临汾-运城盆地塔儿山-二峰山发育大量偏碱性杂岩体, 主要为正长闪长岩、正长岩和石英二长岩, 其次为正长斑岩、花岗斑岩; 出露的岩体与磁异常高值区相对应, 临汾运城盆地正磁异常发育, 反映基底还发育大规模隐伏岩浆岩体(图2)。地球化学数据表明这些偏碱性杂岩体 U、Th 含量较低, U 含量为 $0.76 \times 10^{-6} \sim 1.28 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $3.21 \times 10^{-6} \sim 7.35 \times 10^{-6}$ (王二

文等, 2010; 齐玥等, 2011), 低于地壳克拉克值, 难以提供充足的氦源。但前人通过对塔儿山-二峰山岩体地球化学和同位素研究, 认为岩体来源于岩石圈地幔的部分熔融, 其形成时代为 125~132 Ma(齐玥等, 2011; 芦建军, 2015), 与华北克拉通岩石圈减薄的峰值年龄基本一致(Menzies et al., 1998; Xu, 2001; 嵇少丞等, 2008), 这与邢作云等(2005)关于区域上软流圈受拉张应力作用上拱、地幔持续上涌的认识一致。由于地幔中保留地球形成时的大量氦, 可形成持续的氦源。

2.2 铝土岩生氦条件

山西省和河南省本溪组地层广泛发育一套铝土

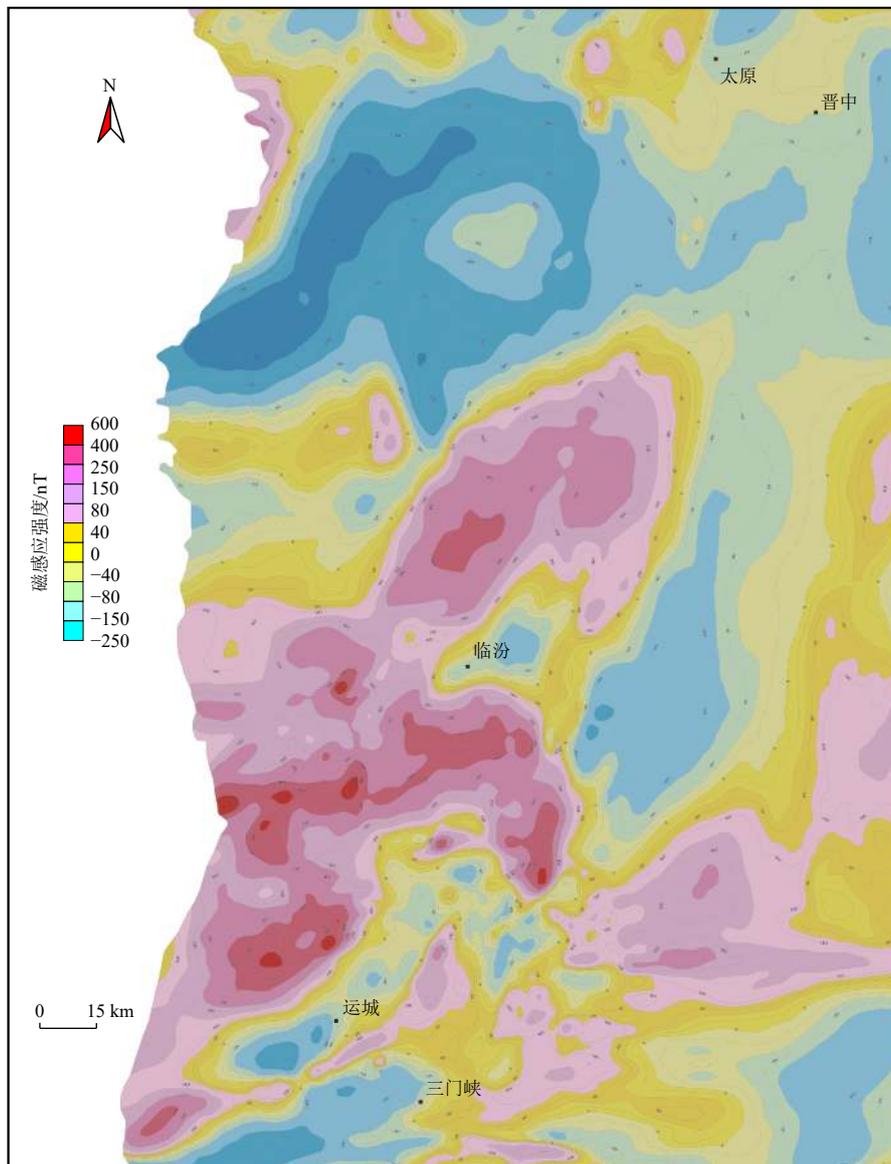


图2 临汾-运城盆地及周边地区航磁异常分布图

Fig. 2 The distribution contour for aeromagnetic anomalies of Linfen-Yuncheng basin and surrounding

岩系,包括含铝黏土岩、铝土岩、铝土矿等,该套铝土岩系普遍具有高的U、Th含量。笔者采集了山西宽草坪铝土矿、曹川铝土矿和河南下冶铝土矿的矿石和铝土岩样品进行分析测试(表1),结果表明宽草坪矿区16件样品的U平均含量为 18.8×10^{-6} ,Th平均含量为 19.3×10^{-6} ;曹川矿区21件样品的U平均含量为 19.9×10^{-6} ,Th平均含量为 35.9×10^{-6} ;下冶矿区17件样品的U平均含量为 16.6×10^{-6} ,Th平均含量为 19.9×10^{-6} 。3个矿区铝土岩系样品的U平均含量为 18.5×10^{-6} ,Th平均含量为 25.6×10^{-6} ,U、Th含量分别为地壳克拉克值的10倍和4.3倍。根据Andrews(1985)的计算,每克U、Th每年分别产生 1.19×10^{-7} 和 2.88×10^{-8} cm³的氦气,本溪组时代按310 Ma计算,宽草坪铝土岩系累计可生氦为2.08 L/m³,曹川铝土岩系累计生氦为2.20

L/m³,下冶铝土岩系累计生氦为1.84 L/m³,生氦能力强,是优质的氦源岩。并且本溪组铝土矿床在山西中南部和河南中北部广泛发育,是中国最重要的铝土矿成矿区(李俊建等,2021;曾威等,2021)。临汾-运城盆地周缘霍西盆地、平陆地区、河东盆地和沁水盆地均有大量铝土矿床分布,是山西省铝土矿分布最集中的地区,因此我们认为本溪组铝土岩系是临汾-运城盆地主要氦源岩之一。

3 氦气运移通道条件

临汾-运城盆地上古生界主要经历了印支期(T₃末)、燕山中-晚期(J₃、K₂)、喜山期(E₁₋₃~N₁)的后期改造(赵俊峰等,2019)。晚三叠世印支运动发生

表1 山西与河南地区铝土岩系化学分析结果表

Tab. 1 Chemical analysis results of bauxite rock series of Benxi Formation in Shanxi and Henan Areas

矿区名称	宽草坪矿区											
样品号	KCP1	KCP2	KCP3	KCP4	KCP5	KCP6	KCP7	KCP8	KCP9	KCP10	KCP11	KCP12
Al ₂ O ₃ (%)	69.84	71.62	72.76	69.46	38.13	39.67	39.1	62.75	56.36	57.11	54.89	41.43
U(10 ⁻⁶)	24.9	35.8	25.5	24.3	10.2	9.22	8.1	17.6	17.5	18.5	18.9	21.1
Th(10 ⁻⁶)	28	30.4	31.7	30.1	22.9	34.6	29.2	7.44	11.1	11.2	14.1	20
矿区名称	宽草坪矿区						下冶矿区					
样品号	KCP13	KCP14	KCP15	KCP16	XY1	XY2	XY3	XY4	XY5	XY6	XY7	XY8
Al ₂ O ₃ (%)	56.11	54.24	59.59	51.23	34.14	37.56	45.88	46.7	46.15	44.56	50.94	37.12
U(10 ⁻⁶)	14.8	20.8	15.8	17.4	9.28	10.4	19	20.2	19	20.2	26.4	26.8
Th(10 ⁻⁶)	8.44	7.39	7.94	14.5	32.7	35	8.64	8.3	6.72	7	9.7	16.6
矿区名称	下冶矿区						曹川矿区					
样品号	XY9	XY10	XY11	XY12	XY13	XY14	XY15	XY16	XY17	CC1	CC2	CC3
Al ₂ O ₃ (%)	40.19	57.63	34.45	38.8	39.49	37.03	29.42	28.77	29.78	32.84	31.53	32.02
U(10 ⁻⁶)	19.1	24.3	11	14.4	14.9	13.3	10.3	11.5	11.8	6.54	6.34	6.13
Th(10 ⁻⁶)	9.14	7.76	24.1	15.4	17	26	35	38.9	40.6	33.7	35.6	33.6
矿区名称	曹川矿区											
样品号	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9	CC10	CC11	CC12	CC13	CC14	CC15
Al ₂ O ₃ (%)	61.74	62.15	35.42	70.39	73.3	73.55	68.42	68.53	68.76	69.38	69.26	67.75
U(10 ⁻⁶)	17.5	21.6	15.6	25.4	21.3	22.5	21.2	20.6	27.9	23.4	27.2	20.4
Th(10 ⁻⁶)	40.8	50	37.8	50.1	42.6	52.3	48.4	47.9	12.9	44.9	6.4	35.2
矿区名称	曹川矿区											
样品号	CC16	CC17	CC18	CC19	CC20	CC21						
Al ₂ O ₃ (%)	77.98	76.13	75.31	73.92	69.77	66.9						
U(10 ⁻⁶)	23.3	26	22.2	24.6	20.8	17.3						
Th(10 ⁻⁶)	23.1	32.1	8.05	14.4	37.6	47						

注: 实验测试在中国地质调查局天津地质调查中心完成。

整体抬升,造成侏罗系下覆地层遭受剥蚀不均匀;晚侏罗世,研究区发生以挤压、抬升作用为主的强烈构造改造,造成晚侏罗世沉积的普遍缺失以及 J_2/K_1 之间的不整合接触(王守义, 1981; 张岳桥等, 2006; Liu et al., 2008); 晚白垩世—古近纪早期,地层又遭受了强烈的挤压抬升,中生界和部分上古生界遭受剥蚀。进入始新世—上新世,临汾—运城盆地逐渐开始发生断陷,盆地东西两侧的霍山、中条山和吕梁山持续抬升,盆内再次接受沉积。

燕山期,随着燕山运动挤压应力的增强山西地块进入以主体断块上升为主的地壳变动期形成了以吕梁—太行断块为主体的基本断块构造,火山活动强烈(芦建军, 2015)。燕山期构造对侏罗纪以前沉积的地层改变颇为强烈,该阶段发育大量以逆断层和逆掩断层为主的控盆深大断裂,包括控制盆地西边界的霍山—罗云山断裂、控制盆地东部的吕梁山山前龙门山逆断裂、控制盆地东部和南部边界的中条山北麓断裂(王乃樑, 1996; 谢新生等, 1996)。其中,霍山—罗云山断裂位于霍山—马头山背斜西翼,总体走向北北东、倾向南东,为一错段古生界的逆掩断裂,二爷庙和峪口一带断面东倾,东盘的太古界逆冲于西盘古生界之上;吕梁山山前龙门山逆断裂位于中条山—万荣巨型复式

背斜的北翼,断面倾向南,由多条逆断层组成叠瓦状断裂带;中条山北麓断裂自南西的北北东向渐变为北部的北北东向,呈向南东突出的弧形,岩石破碎、构造透镜体发育,沿断裂有中生代岩浆岩侵入,具有明显的挤压逆冲特点。这些盆缘深大断裂可有效沟通深部氦源与前新生界。

临汾—运城盆地在喜山期主要受到南东—北西向强烈拉伸构造的影响(郭景林等, 2010)。受此影响,该时期盆地内发育倾向为北北东和近东西向的汾西断裂、汾东断裂、大阳断裂、万安断裂、洪洞—苏堡断裂、韩城断裂、续鲁断裂、曲亭断裂、淹底断裂等断裂(李自红等, 2014; 芦建军, 2015)。从 A—A' 和 B—B' 剖面的构造解释图(剖面位置见图 1a)可明显看出盆内断裂以正断层为主,倾角较大,且多数错断了新生界下部地层,向下延伸至太古宇变质结晶基底(图 3)。如盆内汾西断裂、汾东断裂和浮山断裂均为新生代以来发育的正断层,大约在深度 5~18 km 之间归并到罗云山山前断裂上;又如,曲亭断裂和淹底断裂向下延伸至基底面附近终止到西倾的大阳断裂上,大阳断裂向下消失在上地壳下部的结晶变质岩中(李自红等, 2014)。

临汾—运城盆地内广泛发育的各级断裂,为深部

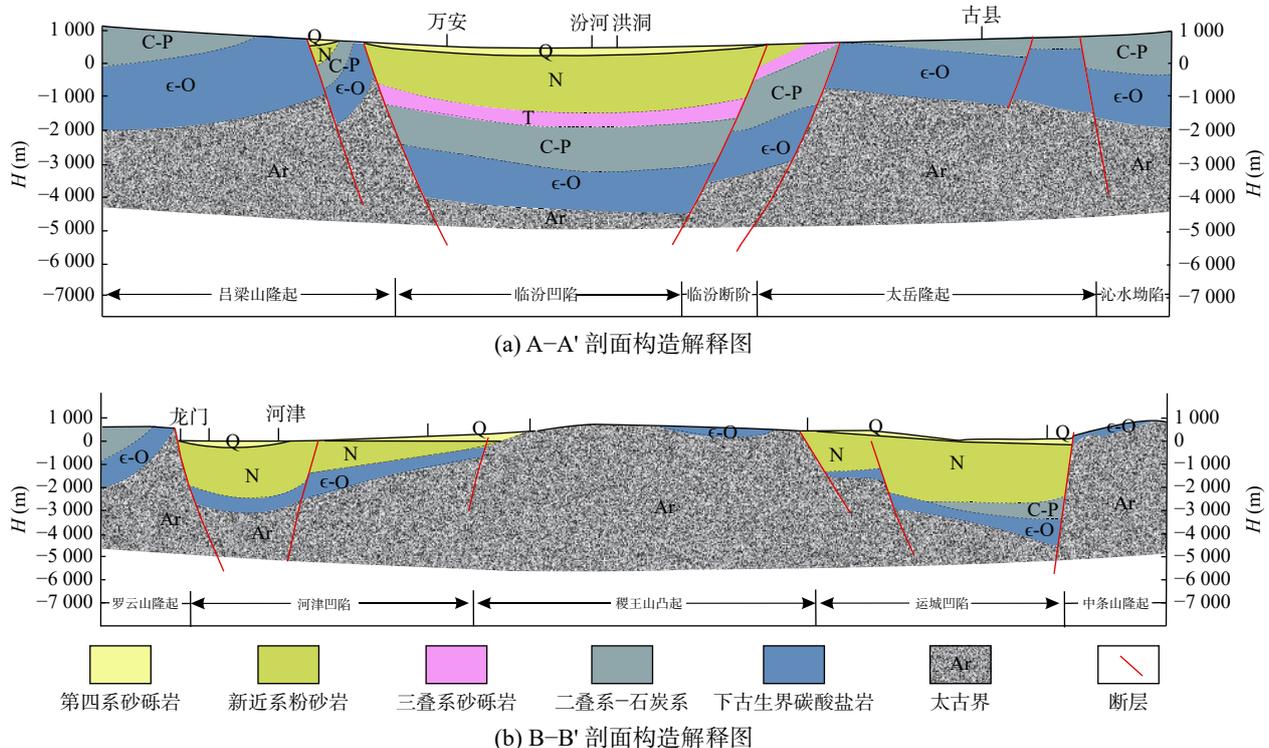


图 3 临汾—运城盆地剖面构造解释图(据李自红, 2014; 芦建军, 2015 修改)

Fig. 3 Structural interpretation of profile in Linfen-Yuncheng basin

氦气运移至地壳浅部储层提供了良好的通道条件。盆地内部断裂与盆地或凹陷边界断裂呈“负花状”构造特征展布(李自红, 2014), 连通性好, 有利于地幔、铝土岩系释放的氦气不断向各地层运移, 为氦气运移至氦载体储层提供主要通道。

4 氦载体特征

4.1 地热资源分布及其成因

临汾-运城盆地分布有洪洞、古城、临汾、曲亭、邓庄、稷山、新绛及侯马-曲沃-翼城地热田, 井口温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 113.85\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地热层位主要为寒武系、奥陶系、新近系和第四系(表 2)(李清林等, 1991; 贺秀全等, 1998; 郭景林等, 2010; 张俊学, 2013; 张海永, 2016; 韩颖等, 2018; 薛鹏, 2020)。

吴乾蕃等(1993)利用浮山-临汾-蒲县地震测深和大地电磁测深资料计算剖面温度场模型, 发现该区地温梯度值总体为 $2.0\sim 2.7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 而在埋深 $10\sim 15\text{ km}$ 处地温梯度可达 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (图 4), 地温梯度明显偏高可能与壳内岩浆余热或岩浆岩放射衰变释热等有关; 在莫霍面($37\sim 40\text{ km}$ 处)及以下, 高导软流圈上隆的临汾地区温度显著高于浮山、蒲县地区(图 4、

图 5)。总体而言, 地热可能与上地幔高温物质上涌、地壳内岩浆余热、衰变释热等因素有关。

前新生界热水点通常沿深大断裂呈线状分布(图 1a), 由于深大断裂多形成在燕山期且部分断裂在喜马拉雅期仍继续活动, 说明地热与氦气一样均受燕山期、喜马拉雅期构造活动的控制。

马家沟组灰岩和白云质灰岩是前新生界最主要的热储层岩石, 具有自形-半自形结构, 晶粒间孔隙、裂隙和孔洞发育, 其地热层段孔隙度一般为 $2.1\%\sim 18\%$, 渗透率为 $0.03\sim 294.53\text{ mD}$ (李海泉等, 2020), 地热储层良好的储集空间和渗透性同样也利于氦气贮藏和运移。

4.2 煤系气特征

临汾-运城盆地主要含煤地层为上石炭统本溪组和二叠系太原组和山西组, 具有南深北浅、区域相变明显的特点, 主要分布在霍州台地、临汾凹陷洪洞、襄汾一带及临猗和万荣以西地区。本溪组-山西组为海相-陆相过渡沉积环境, 其中本溪组主要为障壁-泻湖和碳酸盐岩陆棚沉积环境, 煤层薄而不稳定; 太原组以下三角洲平原相为主, 局部发育泻湖相和滨外碳酸盐陆棚相, 分流河道及河口坝地势较高且紧邻海水而常形成海水入侵; 山西组属上三角洲平原沉积环境,

表 2 临汾-运城盆地的地热田分布情况统计表

Tab. 2 Statistical table of distribution of geothermal fields in Linfen-Yuncheng basin

序号	地热田名称	地理位置	构造单元	热储层位及岩性	热储层埋深 (m)	热储温度 ($^{\circ}\text{C}$)	资料来源
1	洪洞地热田	洪洞县辛村镇	临汾凹陷	奥陶系灰岩、白云质灰岩	2296.34~ 2650.96	96~113.85 平均105	范林森, 2013; 韩颖等, 2018; 郭景林等, 2010
2	古城地热田	临汾市尧都区		奥陶系灰岩、白云质灰岩	1200~2200	45~47	
3	邓庄地热田	襄汾县邓庄镇 尧都贾得乡	奥陶系灰岩、白云质灰岩	1288~1800	41~42		
4	新绛地热田	新绛县、北池、 刘峪村	侯马凹陷	第四系松散层	100~230	25~34	李清林等, 1991; 张俊学, 2013
5				寒武系灰岩、奥陶系白云 质灰岩	600~1300	62~82	
6	曲沃地热田	侯马、翼城	河津凹陷	奥陶系下马家沟组、上马 家沟组、峰峰组	270~1998	25~50	韩颖等, 2018; 李海泉等, 2020
6	稷山地热田	稷山县清河镇		新近系、第四系	180~287	37~51	
8	河津地热田	河津市、万荣县	峨嵋台地	寒武系灰岩	1213~2100	44.5~67	贺秀全等, 1998; 郭景林等, 2010
9	闻喜地热田	闻喜县		寒武系灰岩、奥陶系白云 质灰岩	1212~1805	33.7~67.5	
10	万荣地热田	临猗县、 稷山县	运城凹陷	新近系、第四系	800~1600	40~48	韩颖等, 2018; 林强, 2021; 薛鹏, 2020
11	运城地热田	夏县、临猗县		120~498	30~44		
		运城、永济市	寒武系、奥陶系灰岩	1001~3005	38~68	韩颖等, 2018; 薛鹏, 2020; 贺秀全等, 1998; 郭景林等, 2010	

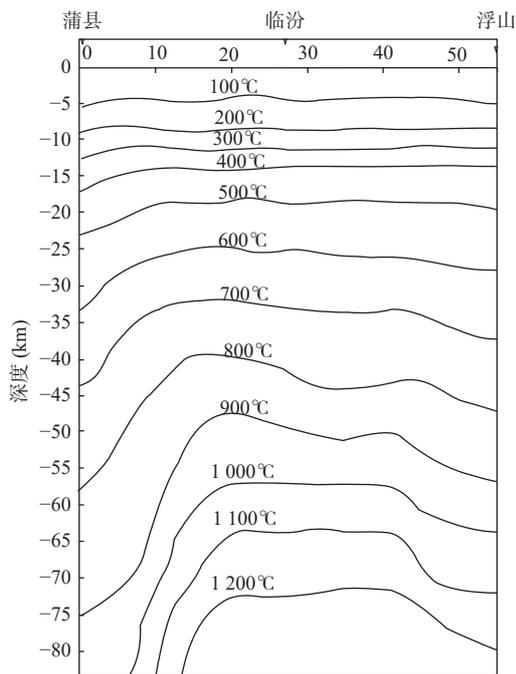


图4 临汾-运城盆地深层温度场分布图

(据吴乾蕃等, 1993 修改)

Fig. 4 The distribution of temperature field in deep strata of Linfen-Yuncheng basin

分流河道、三角洲平原、沼泽相发育,局部可形成稳定的厚煤层。

由于煤层气和页岩气具有自生自储特点,致密砂岩气烃源岩来自下伏煤和暗色泥岩,均为典型煤系气,其成因与煤和暗色泥岩分布和生烃作用密不可分。不少学者针对临汾-运城盆地二叠系煤系气开展了一系列研究工作(胡圣标等, 2001; 于文龙, 2019; 赵俊峰等, 2019; 郝少伟, 2020; 杨洪雨, 2020; 韩勇, 2021),发现运城凹陷万荣、临猗及其以西地区新生界埋深仅为300~500 m,地温梯度为2.77 °C/100 m(胡圣标等, 2001),烃源岩生烃条件较差;临汾凹陷及北部地区二叠系煤的镜质组反射率为1.41%~3.0%(曹冀龙, 2016);暗色泥岩有机碳含量为0.28%~18.96%,镜质组反射率为1.03%~2.10%(于文龙, 2019; 贾腾飞等, 2020)。临汾凹陷石炭系-二叠系有机质主体处于高成熟-过成熟阶段,利于产气,具备形成煤层气、页岩气和致密砂岩气等煤系气的基础条件。

于文龙(2019)通过实验发现临汾凹陷太原组暗色泥页岩最大吸附量平均为1.04 m³/t,孔隙度为0.45%~2.41%,总表面积为2.1~9.41 m²/g,孔体积为0.0049~0.021 cm³/g;杨洪雨(2020)发现山西组泥页岩最大吸附量为0.9805~1.1978 m³/t,反映其具有良

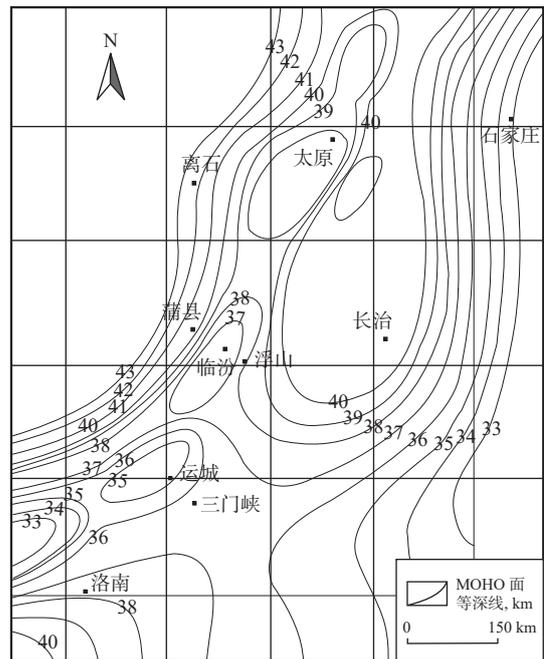


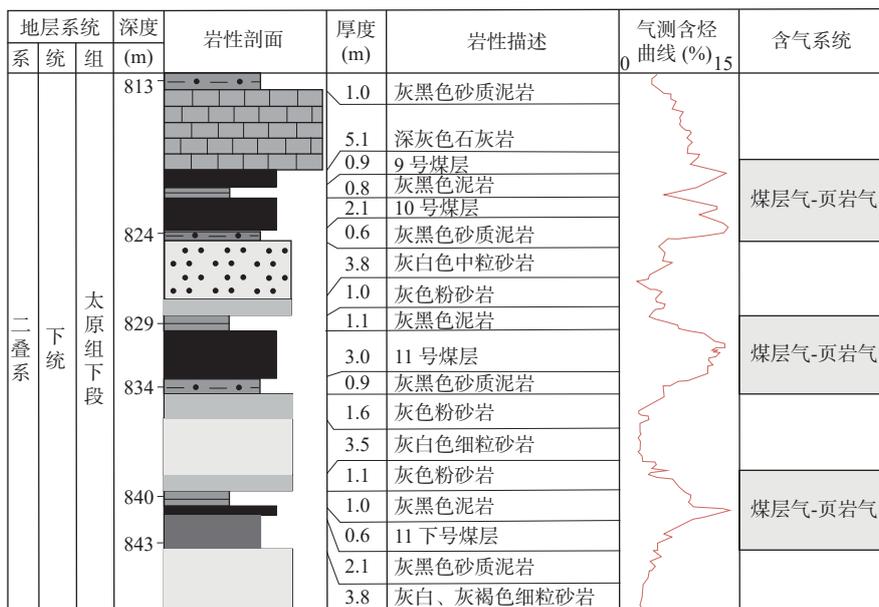
图5 临汾-运城盆地及周边地区莫霍面埋深等值线图

(据邢作云等, 2005 修改)

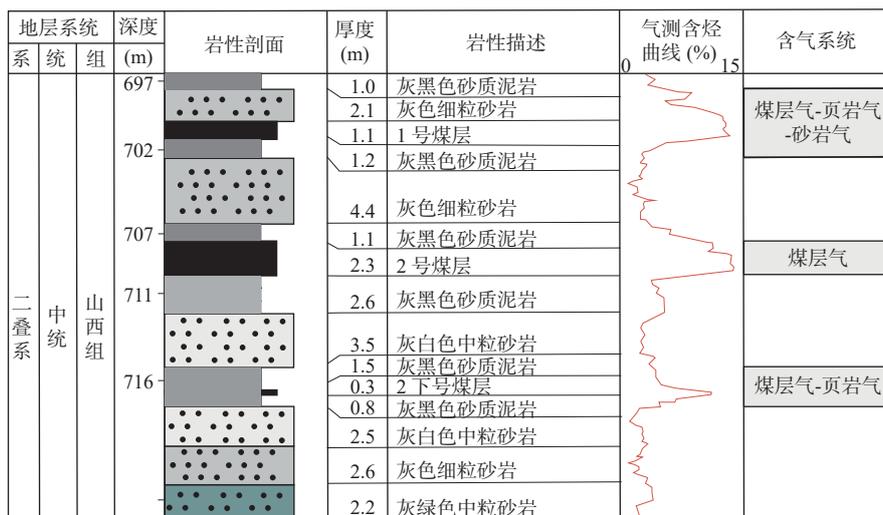
Fig. 5 Contour map for depth of MOHO in Linfen-Yuncheng basin and its surrounding

好的甲烷储集空间。笔者根据赵国飞(2021)气测录井资料判断临汾凹陷及周边地区石炭系-二叠系发育6套含气系统(图6),其中,太原组发育3套煤层气-页岩气系统(图6a),山西组发育1套煤层气-页岩气-砂岩气含气系统、1套独立煤层气系统和1套煤层气-页岩气含气系统(图6b)。另外,郝少伟(2020)在临汾凹陷洪洞地区山西组顶部乃至下石盒子组砂岩中也发现一定气测异常。气测录井资料和含气性测试实验反映临汾凹陷太原组、山西组含气条件较好。从保存条件来看,临汾凹陷临汾-洪洞地区具有较好的盖层条件,芦建军等(2015)、赵俊峰等(2019)研究表明临汾-洪洞地区石炭系-二叠系之上为三叠系覆盖,三叠系之上新生界厚度为500~2000 m,三叠系和新生界发育的泥岩可作为煤系气的优质盖层。总之,在临汾凹陷临汾-洪洞地区具备煤系气的成藏条件。

目前工业利用的氦气均从天然气中提取,还没有发现独立的氦气藏。前述分析表明临汾-洪洞地区具备煤系气成藏条件,而该地区地热水伴生气中氦气含量较高,盆地内及周缘本溪组铝土岩系氦源岩广范分布,具备较好的氦源基础。燕山期、喜马拉雅期构造活动形成大量的盆缘深大断裂、盆地内部层间断裂为氦气的运移提供了良好通道条件。综合分析认为,临



(a) 临汾凹陷北部地区太原组含气系统柱状图



(b) 临汾凹陷北部地区山西组含气层段含气系统柱状图

图 6 临汾凹陷北部地区二叠系主要含气系统综合柱状图 (据赵国飞, 2021 修改)

Fig. 6 Comprehensive histogram of main Carboniferous-Permian gas bearing systems in the north Linfen depression

汾凹陷临汾-洪洞地区具备富氦天然气的找矿前景。

(3)临汾凹陷临汾-洪洞地区具有优越的煤系气生烃-成藏条件,且临汾拗陷地热水伴生气中氦气含量高,综合分析认为临汾凹陷临汾-洪洞地区具备寻找富氦天然气的前景。

5 结论

(1)临汾-运城盆地具备凹陷区地幔上涌和本溪组铝土岩系 2 种氦源条件。

(2)深层热水点明显受深大断裂控制,罗云山等控盆深大断裂及盆地内正断层为深源氦气运移至浅部地热储层和煤系气储层提供了良好的通道条件。

参考文献(References):

曹冀龙. 临汾-运城盆地油气资源现状调查[J]. 地下水, 2016, 38(2): 211-212.

- CAO Jilong. Investigation on current situation of oil and gas resources in Linfen-Yuncheng Basin[J]. *Ground Water*, 2016, 38(2): 211-212.
- 柴先平. 西安地热热水伴生富氮天然气成因研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- CHAI Xianping. Study on the origin of helium-rich natural gas associated with geothermal water in Xi'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- 常兴浩, 宋凯. 巴什托构造石炭系小海子组高氮气藏成藏机理浅析[J]. *天然气工业*, 1997, 17(2): 18-20.
- CHANG Xinghao, SONG Kai. Analysis of reservoir-forming mechanism of high-he pool in the carboniferous of xiaohaizi formation of bashitou structure[J]. *Natural Gas Industry*, 1997, 17(2): 18-20.
- 陈文正. 再论四川盆地威远震旦系气藏的气源[J]. *天然气工业*, 1992, 12(6): 28-32.
- CHEN Wenzheng. Discussing again on the source of Sinian gas pool in Weiyuan gas field in Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1992, 12(6): 28-32.
- 程守田, 黄焱球, 付雪洪. 早中侏罗世大鄂尔多斯古地理重建与内陆拗陷的发育演化[J]. *沉积学报*, 1997, (4): 45-51.
- CHEN Shoutian, HUANG Yanqiu, FU Xuehong. Paleogeography reconstruction of early-middle Jurassic large Ordos basin and development and evolution of continental downwarping[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, (4): 45-51.
- 戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(5): 473-480.
- DAI Jinxing. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gas-field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(5): 473-480.
- 范林森. 山西省洪洞县奥陶系岩溶水地热资源评价[J]. *能源与节能*, 2013, 12: 110-113.
- FAN Linsen. Assessment of ordovician karst water geothermal resources in Hongtong county of Shanxi province[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2013, 12: 110-113.
- 封万芳. 威远天然气提氮的经济效益分析[J]. *天然气工业*, 1989, 9(3): 69-71.
- FENG Wanfang. Analysis of economic benefit of extracting Helium from Weiyuan natural gas[J]. *Natural Gas Industry*, 1989, 9(3): 69-71.
- 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 Zihui, HUO Qiuli, WANG Xue. A study of Helium reserve formation characteristic in the north part of Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(5): 27-30.
- 郭景林, 白翠花. 山西临汾-运城盆地中的热干岩型地热资源及开发前景展望[J]. *山西煤炭*, 2010, 30(8): 79-82.
- GUO Jinglin, BAI Cuihua. Outlook of Hot-dry-rock geothermal energy in Linfen-Jincheng Basin[J]. *Shanxi Coal*, 2010, 30(8): 79-82.
- 韩颖, 白雪峰, 张欣. 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.
- 韩勇. 临汾-洪洞地区山西组页岩气成藏的构造控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- HAN Yong. Structural control of shale gas accumulation in Shanxi Formation in Linfen-Hongtong area[D]. Xuzhou: China University & Mining Technology, 2021.
- 郝少伟. 山西省临汾-洪洞区块煤系非常规天然气成藏特征[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(2): 67-73.
- HAO Shaowei. Coal measures unconventional natural gas reservoiring features in Linfen-Hongtong Block, Shanxi Province[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(2): 67-73.
- 贺秀全, 陈建锋. 山西省地热资源研究[J]. *华北地质矿产杂志*, 1998, (2): 89-90+92-94.
- HE Xiuquan, CHEN Jianfeng. A study of geothermal resources of Shanxi[J]. *Jour Geol & Min Res North China*, 1998, (2): 89-90+92-94.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(5): 611-626.
- HU Shengbiao, HE Lijuan, WANG Jiyang. Compilation of heat flow data in the china continental area(3rd Edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 611-626.
- 稽少丞, 王茜, 许志琴. 华北克拉通破坏与岩石圈减薄[J]. *地质学报*, 2008, (2): 174-193.
- JI Shaocheng, WANG Qian, XU Zhiqin. Break-Up of the North China Craton through Lithospheric Thinning[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, (2): 174-193.
- 贾腾飞, 王猛, 赵健光. 沁水盆地石炭-二叠系煤系页岩气储层特征及生烃潜力分析-以山西省临汾市Y1井为例[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(6): 2169-2178.
- JIA Tengfei, WANG Meng, ZHAO Jianguang. Physical characters of coal shale reservoirs and potential analysis of qinshui basin: an example from Y1 well Linfen city, Shanxi Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(6): 2169-2178.
- 李海泉, 朱青奇, 刘金侠. 临汾-运城盆地曲沃地热田热储特征研究[J]. *地下水*, 2020, 42(1): 14-17.
- LI Haiquan, ZHU Qingqi, LIU Jinxia. Reservoir characteristics of Quwo geothermal Field in Linfen Basin[J]. *Ground Water*, 2020, 42(1): 14-17.

- 李俊建, 彭翼, 张彤, 等. 华北地区成矿单元划分[J]. 华北地质, 2021, 44(3): 4-24.
- LI Junjian, PENG Yi, ZHANG Tong, et al. Division of metallogenic units in North China[J]. North China Geology, 2021, 44(3): 4-24.
- 李济远, 李玉宏, 胡少华, 等. “山西式”氦气成藏模式及其意义[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(3): 529-536.
- LI Jiyuan, LI Yuhong, HU Shaohua, et al. “Shanxi-type” Helium accumulation model and its essentiality[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(3): 529-536.
- 李清林, 王夫运, 黄邦武, 等. 洛阳、新绛、夏县地热田的重磁异常特征[J]. 物探与化探, 1991, 15(2): 129-133.
- LI Qinglin, WANG Fuyun, HUANG Bangwu, et al. Characteristics of gravity and magnetic anomalies of geothermal fields in Luoyang, Xinjiang and Xiaxiang[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1991, 15(2): 129-133.
- 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 Jincan, 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, 张文, 王利, 等. 亨利定律与壳源氦气弱源成藏-以渭河盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2017a, 28(4): 495-501.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Henry's Law and Accumulation of Crust-Derived Helium: A case from Weihe Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017a, 28(4): 495-501.
- 李玉宏, 张文, 王利, 等. 壳源氦气成藏问题及成藏模式[J]. 西安科技大学学报, 2017b, 37(4): 565-572.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Several issues in the accumulation of crust-derived helium and the accumulation model[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017b, 37(4): 565-572.
- 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 国内外氦气资源勘探开发现状及其对中国的启示[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 233-240.
- LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Exploration and Development Status of World Helium Resources and Its Implications for China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 233-240.
- 李自红, 刘保金, 袁洪克, 等. 临汾-运城盆地地壳精细结构和构造---地震反射剖面结果[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1487-1497.
- LI Zihong, LIU Baojin, YUAN Hongke, et al. Fine crustal structure and tectonics of Linfen basin-from the results of seismic reflection profile[J]. Chinese Journal of Geophysics Chinese Edition, 2014, 57(5): 1487-1497.
- 林强. 山西省闻喜县地热资源成因分析[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(11): 172-173+182.
- LIN Qiang. Genesis analysis of geothermal resources in Wenxi county, Shanxi province[J]. West China Exploration Engineering, 2021, 33(11): 172-173+182.
- 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 Chao, SUN Beilei, 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(4): 1280-1287.
- 刘池洋. 叠合盆地特征及油气赋存条件[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 1-7.
- LIU Chiyang. Geologic characteristics and petroleum accumulation conditions of superimposed basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 1-7.
- 刘绍龙. 华北地区大型三叠纪原始沉积盆地的存在[J]. 地质学报, 1986, 2: 128-137.
- LIU Shaolong. The existence of a large-scale Triassic sedimentary basin in north China[J]. Acta Geological Sinica, 1986, 2: 128-137.
- 卢进才, 魏仙祥, 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, (3): 82-86.
- LU Jincan, WEI Xianxiang, LI Yuhong, et al. Preliminary study about genesis and pool formation conditions of rich-helium type natural gas[J]. Northwestern Geology, 2005, (3): 82-86.
- 芦建军. 临汾-运城盆地中生界沉积特征与资源潜力分析[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- LU Jianjun. Sedimentary characteristics and resource potential analysis of mesozoic in Linfen-Yuncheng basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- 齐玥, 徐鸿博, 张竞雄, 等. 临汾断陷盆地孤峰山花岗闪长岩的地球化学和年代学及其地质意义[J]. 地质论评, 2011, 57(4): 565-573.
- QI Yue, XU Hongbo, ZHANG Jingxiong, et al. Geochemistry, geochronology and geological significance of Gufengshan granodiorite in Linfen grabben basin[J]. Geological Comments, 2011, 57(4): 565-573.
- 祁凯. 华北克拉通中西部中-新生代岩石圈热-流变结构及深部岩浆-热力作用过程[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- QI Kai. Meso-Cenozoic lithospheric thermal-rheological structure and deep magmatic-thermal process in the WNCC[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- 孙国凡, 刘景平, 刘克琪, 等. 华北中生代大型沉积盆地的发育

- 及其地球动力学背景[J]. *石油与天然气地质*, 1985, 6(3): 280-286.
- SUN Guofan, LIU Jingping, LIU Keqi, et al. Evolution of a major mesozoic continental basin within Huabei plate and its geodynamic setting[J]. *Geological Comments on Petroleum and Natural Gas*, 1985, 6(3): 280-286.
- 王二文. 塔儿山-二峰山碱性、偏碱性杂岩体岩石学和地球化学特征[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- WANG Erwen. The Characteristics of petrology and geochemical of taershan and erfengshan alkaline, subalkaline complex[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- 王乃樑, 杨景春, 夏正楷, 等. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- WANG Nailiang, YANG Jingchun, XIA Zhengkai, et al. Cenozoic sedimentary and Tectonic landforms of the shanxi grabens[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- 王守义. 晋西北的早白垩世砾石层及其成因之探讨[J]. *地质论评*, 1981, 1: 40-45+94-95.
- WANG Shouyi. The Preliminary Study on the origin of an early cretaceous conglomerate bed in northwestern Shanxi[J]. *Geological Review*, 1981, 1: 40-45+94-95.
- 王双明, 张玉平. 鄂尔多斯侏罗纪盆地形成演化和聚煤规律[J]. *地质前缘*, 1999, (增刊): 147-155.
- WANG Shuangming, ZHANG Yuping. Study on the formation, evolution and coal-accumulating regularity of the Jurassic Ordos basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, (增刊): 147-155.
- 王先彬, 陈践发, 徐胜, 等. 地震区温泉气体的地球化学特征[J]. *中国科学(B辑化学生命科学地学)*, 1992, (8): 849-854.
- WANG Xianbin, CHEN Jianfa, XU Sheng, et al. Geochemical Characteristics of Hot Spring Gas In Earthquake Area[J]. *Science China (Part B: Chemistry, Life sciences, Geosciences)*, 1992, (8): 849-854.
- 王招明, 王清华, 赵孟军, 等. 塔里木盆地和田河气田天然气地球化学特征及成藏过程[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, (S2): 69-79.
- WANG Zhaoming, WANG Qinghua, ZHAO Mengjun, et al. Geochemical characteristics and reservoir forming process of natural gas in hetianhe gas field, Tarim basin[J]. *Science China (Part D: Earth Science)*, 2007, (S2): 69-79.
- 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 Huajin, 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.
- 谢新生, 肖振敏, 王维襄. 晋中南断陷盆地中生代构造演化及临汾盆地现今构造应力场研究[J]. *地壳构造与地壳应力文集*, 1996, S1: 111-118.
- XIE Xinsheng, XIAO Zhenmin, Wang Weixiang. Tectonic evolution of meso-cenozoic fault basins of adjacent area in middle southern of Shanxi province and the present Tectonic stress field in Linfen basin[J]. *Anthology of Crustal Structure and Crustal Stress*, 1996, S1: 111-118.
- 邢作云, 赵斌, 涂美义, 等. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究[J]. *地质前缘*, 2005, 12(2): 247-262.
- XING Zuoyun, ZHAO Bin, TU Meiyi, et al. The formation of the Fenwei rift valley[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 247-262.
- 徐永昌, 刘文汇, 沈平, 等. 天然气地球化学的重要分支-稀有气体地球化学[J]. *天然气地球科学*, 2003, (3): 157-166.
- XU Yongchang, LIU Wenhui, SHEN Ping, et al. An important branch of gas geochemistry-noble gas geochemistry[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, (3): 157-166.
- 徐永昌, 沈平, 李玉成. 中国最古老的气藏——四川威远震旦纪气藏[J]. *沉积学报*, 1989, (4): 3-13.
- XU Yongchang, SHEN Ping, LI Yucheng. The oldest gas pool of China: Weiyuan Sinian gas pool, Sichuan province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, (4): 3-13.
- 徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造环境[J]. *地质前缘*, 1997, (Z2): 189-194.
- XU Yongchang. Helium isotope distribution of natural gasses and its structural setting[J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, (Z2): 189-194.
- 薛华锋, 朱兴国, 王润三, 等. 西安地热田伴生富氦天然气资源的发现及意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2004, (6): 751-754.
- XUE Huafeng, ZHU Xingguo, WANG Runsan, et al. The discovery and significance frich helium natural gas resource in Xi'an geothermic field[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2004, (6): 751-754.
- 薛鹏. 山西省万荣县地热资源成因分析[J]. *华北自然资源*, 2020, (5): 56-58.
- XUE Peng. Study on the origin of geothermal resources in wanrong county, Shanxi province[J]. *Huabei Natural Resources*, 2020, (5): 56-58.
- 杨洪雨. 山西临汾-洪洞地区山西组页岩气储层特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- YANG Hongyu. Characteristics of shale gas reservoirs of Shanxi formation, Linfen-Hongtong area, Shanxi [D]. Xuzhou: China University of Ming and Tecnology, 2020.
- 杨明慧, 刘池洋, 曾鹏, 等. 华北克拉通晚三叠世沉积盆地原型与破坏早期构造变形格局[J]. *地质论评*, 2012, 58(1): 1-18.

- YANG Minghui, LIU Chiyang, ZENG Peng, et al. Prototypes of late Triassic sedimentary basins of north China craton (NCC) and deformation pattern of its early destruction[J]. *Geological Review*, 2012, 58(1): 1-18.
- 于文龙. 山西临-洪地区上古生界太原组页岩气储层特征及其成藏机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YU Wenlong. Reservoirs characteristics and accumulation mechanism of shale gas in the upper Paleozoic Taiyuan formation, Lin-Hong area, Shanxi[D]. Xuzhou: China University of Ming and Tecnology, 2019.
- 余琪祥, 史政, 王登高, 等. 塔里木盆地西北部氦气富集特征与成藏条件分析[J]. *西北地质*, 2013, 46(4): 215-222.
- YU Qixiang, SHI Zheng, WANG Denggao, et al. Analysis on Helium enrichment characteristics and reservoir forming conditions in northwest Tarim basin[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 215-222.
- 曾威, 王佳营, 李俊建, 等. 华北地区铝土矿成矿规律概要[J]. *华北地质*, 2021, 44(3): 25-32.
- ZENG Wei, WANG Jiaying, LI Junjian, et al. Summary on metallogenic regularity of bauxite ore deposits in north China[J]. *North China Geology*, 2021, 44(3): 25-32.
- 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(2): 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(2): 195-202.
- 张海永. 山西沉积盆地地热资源分布及其特征[J]. *华北国土资源*, 2016, (6): 115-116.
- ZHANG Haiyong. Distribution and characteristics of geothermal resources in sedimentary basin in Shanxi[J]. *Huabei Land and Resources*, 2016, (6): 115-116.
- 张俊学. 新绛县地热资源的开发与利用[J]. *岩土工程技术*, 2013, 26(1): 41-42, 51.
- ZHANG Junxue. Development and utilization analysis of geothermal resources in Xinjiang[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2013, 26(1): 41-42, 51.
- 赵国飞. 山西石炭-二叠纪煤系气储层类型及其适应性致裂方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- ZHAO Guofei. Research on reservoir types and their adaptive fracturing methods of coal measure gas in carboniferous-permian period of Shanxi province[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- 赵俊峰, 盛双占, 王栋, 等. 临汾-运城盆地上古生界演化、改造及油气资源潜力分析[J]. *地质论评*, 2019, 65(1): 168-180.
- ZHAO Junfeng, SHENG Shuangzhan, WANG Dong, et al. Analysis on evolution, modification and hydrocarbon resources potential of the upper Paleozoic in the Linfen-Yuncheng basin[J]. *Geological Review*, 2019, 65(1): 168-180.
- 赵文智, 王新民, 郭彦如, 等. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世原型盆地及其改造演化[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(1): 6-13.
- ZHAO Wenzhi, WANG Xinmin, GUO Yanru, et al. Restoration and tectonic reworking of the late Triassic basin in western Ordos basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(1): 6-13.
- 张岳桥, 施炜, 廖昌珍, 等. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换[J]. *地质学报*, 2006, 5: 639-647.
- ZHANG Yueqiao, SHI Wei, LIAO Changzhen, et al. Fault Kinematic analysis and Change in late Mesozoic Tectonic stress regimes in the peripheral zone of the Ordos Basin, North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 5: 639-647.
- 张乔, 周俊林, 李玉宏, 等. 渭河盆地南缘花岗岩中生代氦元素(U, Th)赋存状态及制约因素研究——以华山复式岩体为例[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 241-256.
- ZHANG Qiao, ZHOU Junlin, LI Yuhong, et al. The Occurrence State and Restraint Factors of Helium-produced Elements (U, Th) in the Granites from the Southern Margin of Weihe Basin: Evidence from Huashan Complex[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 241-256.
- Andrews J N. The isotopic composition of radiogenic helium and its use to study groundwater movement in confined aquifers[J]. *Chemical Geology*, 1985, 49: 339-351.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Zhao Junfeng, et al. Temporo-spatial coordinates of evolution of the Ordos and its mineralization responses[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2008, 82(6): 1229-1243.
- Menzies M A, Xu Y G. Mantle dynamics and plate interactions in east Asia[J]. Washington DC: American Geophysical Union Geodynamic Series, 1998, 27: 155-165.
- Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath eastern China: Evidence Timing and Mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, 26: 747-757.