

引用: 程建, 周小进, 王萍, 等. 鄂尔多斯盆地周缘及外围盆地矿权空白区有利拓展方向研究[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(6): 90-104.

Cheng Jian, Zhou Xiaojin, Wang Ping, et al. Study on the favorable expansion orientation of mining rights blank zones in the peripheral Ordos Basin and surrounding basins[J].

China Petroleum Exploration, 2023, 28(6): 90-104.

鄂尔多斯盆地周缘及外围盆地矿权空白区 有利拓展方向研究

程建 周小进 王萍 曹清古 余琪祥 李凤丽

(中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所)

摘要: 鄂尔多斯盆地及外围的河套、银川、六盘山、渭河等盆地具有多类型资源同盆共生的特点, 在中国陆上大盆地中有明显的资源优势, 但资源探明程度低, 且存在大量矿权空白区, 是油公司选区评价及未来拓展矿权与资源空间的重要目标。通过跟踪勘探新发现, 总结地质新认识, 类比矿权空白区与其相邻探区成藏条件与资源潜力后发现, 鄂尔多斯盆地东缘中段的万镇地区上古生界煤层、暗色泥岩厚度大, 生烃强度高, 且构造背景稳定, 上古生界致密气与深层煤层气具有勘探潜力; 盆地北缘杭锦旗、东胜地区石炭系—二叠系煤层残留厚度大, 埋深适中, 是煤层气与煤化工的有利地区; 盆地西缘中—上奥陶统发育海陆棚相泥页岩, 烃源基础好, 已发现多个以乌拉力克组(平凉组)为主力烃源岩的台缘礁滩或裂缝型油气藏, 结合保存条件研究, 认为西缘石沟驿向斜、陶乐断阶带是勘探下古生界碳酸盐岩、海相页岩油气的有利区。外围盆地中以河套盆地临河坳陷最为有利, 下白垩统固阳组、渐新统临河组两套优质烃源岩覆盖临河坳陷大部分地区, 生烃势能力强, 围绕主力的生烃凹陷淖西洼槽, 东南断阶带发育多组深切的走滑断层, 通源性好, 高效成藏模式已经得到证实; 六盘山盆地发育与鄂尔多斯盆地相似的三叠系、侏罗系烃源岩, 生烃条件好, 盆地深层值得进一步探索; 银川盆地钻井发现了清水营组咸化湖相烃源岩和含油构造, 盆地北部成熟生烃凹陷周缘构造带是有利勘探方向; 渭河盆地、河套盆地呼和坳陷处在经济发达区, 钻井见到丰富的水溶氨气、地热能、生物气显示, 这些地区的油气共生资源可作为常规油气的补充进行综合勘探, 实现资源就地转化与综合利用。通过研究, 建议在鄂尔多斯盆地万镇、合阳、杭锦旗—准格尔旗、陶乐断阶带、石沟驿向斜, 以及六盘山盆地海原—固原凹陷、山前推覆构造带, 河套盆地临河坳陷东南断阶带、呼和坳陷, 银川盆地平罗凹陷等有利区内设置、规划10个新矿权, 建议相关单位加强矿权空白区预评价、预研究, 积极评价论证新区块油气潜力, 为维持油公司矿权进退动态平衡和保障生存空间奠定基础。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 河套盆地; 六盘山盆地; 银川盆地; 渭河盆地; 油气矿权; 油气矿权空白区; 矿权拓展

中图分类号: TE121

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.06.011

Study on the favorable expansion orientation of mining rights blank zones in the peripheral Ordos Basin and surrounding basins

Cheng Jian, Zhou Xiaojin, Wang Ping, Cao Qinggu, Yu Qixiang, Li Fengli

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec)

Abstract: Ordos Basin and its surrounding basins such as Hetao, Yinchuan, Liupanshan, and Weihe are characterized by coexistence of multiple

基金项目: 中国石化油田部科研专项“中石化油气探矿权战略选区与竞标策略分析”(YTBXD-KQCL-2022-1-02-001-SKY)。

第一作者简介: 程建(1984-), 男, 四川万源人, 硕士, 2010年毕业于成都理工大学, 高级工程师, 主要从事含油气盆地分析与油气综合选区评价工作。地址: 江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道2060号中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 邮政编码: 214126。E-mail: chengjian.syky@sinopec.com

收稿日期: 2023-08-29; 修改日期: 2023-10-30

types of resources in one basin, and they have prominent resource advantages in China's large onshore basins. However, the degree of resource exploration is low, and there are a large number of mining rights blank zones, which are the major targets for favorable area screening and mining rights and resource space expansion of oil companies in the future. After analyzing new discoveries, summarizing new geological understanding, and correlating hydrocarbon accumulation conditions and resource potential in mining rights blank zones with the adjacent exploration areas, the study results indicate that: (1) The Upper Paleozoic coal seams and dark mudstone have a large thickness and high hydrocarbon generation intensity, and the structural settings are stable in Wanzhen area in the middle section of the eastern basin margin, showing exploration potential of tight gas and deep coalbed methane in the Upper Paleozoic. (2) The Carboniferous-Permian coal seams have a large residual thickness and moderate burial depth in Hangjinqi and Dongsheng areas in the northern basin margin, which are favorable areas for coalbed methane and coal chemical industry. (3) The continental shelf facies shale was developed in the Middle-Late Ordovician in the western basin margin, with a wide area and good hydrocarbon source conditions. Multiple platform marginal reef or fractured type oil and gas reservoirs mainly supplied by source rock in Ulalik Formation (Pingliang Formation) have been discovered. Based on the study of preservation conditions, it is believed that Shigouyi syncline and Taole fault terrace zone in the western basin margin are favorable areas for discovering the Lower Paleozoic carbonate and marine shale oil and gas reservoirs. (4) Among the surrounding basins, Linhe Depression in Hetao Basin is the most favorable exploration area. Two sets of high-quality source rocks were deposited in the Lower Cretaceous Guyang Formation and the Oligocene Linhe Formation in most areas in Linhe Depression, with strong hydrocarbon generation potential. Surrounding the main hydrocarbon generation Naoxi sub-sag, multiple sets of deep strike slip faults were developed in the southeast fault terrace zone, showing good connection to source rock. The high-efficiency hydrocarbon accumulation mode has been confirmed. (5) The Triassic and Jurassic source rocks were developed in Liupanshan Basin with good hydrocarbon generation conditions similar to those in Ordos Basin. The deep formations in the basin are worthy of further exploration. (6) The saline lake facies source rock in Qingshuiying Formation and oil-bearing structures were proved by wells in Yinchuan Basin. The structural belt in the peripheral mature hydrocarbon generating sag in the northern basin is a favorable orientation for exploration. (7) Weihe Basin and Huhe Depression in Hetao Basin are located in economically developed areas, and abundant shows of water soluble helium gas, geothermal energy, and biogenic gas have been penetrated by drilling activities. The oil and gas co associated resources in these areas are complementary to conventional oil and gas exploration, and the in-situ transformation and comprehensive utilization of resources can be achieved. After study, it is suggested that 10 new mining rights should be established and planned in favorable areas such as Wanzhen, Heyang, Hangjinqi-Zhungeerqi, Taole fault terrace zone, and Shigouyi syncline in Ordos Basin, Haiyuan-Guyuan Sag and the piedmont nappe structural belt in Liupanshan Basin, the southeast fault terrace zone in Linhe Depression and Huhe Depression in Hetao Basin, as well as Pingluo Sag in Yinchuan Basin. In addition, it is recommended that relevant companies should strengthen the pre evaluation and pre research in mining rights blank zones, and actively evaluate and demonstrate oil and gas potential in new blocks, so as to lay the foundation for maintaining the dynamic balance between farm-in and farm-out of mining rights and ensuring survival space of oil companies.

Key words: Ordos Basin, Hetao Basin, Liupanshan Basin, Yinchuan Basin, Weihe Basin, oil and gas mining rights, oil and gas mining rights blank zone, mining rights expansion

0 引言

鄂尔多斯盆地面积为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是古生代克拉通与中生代台内拗陷叠合发育的大型含油气盆地, 含伊盟隆起、渭北隆起、天环拗陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带及西缘冲断带 6 个次级构造单元。古近纪开始, 鄂尔多斯盆地周边地区开始陷落, 形成河套、银川、六盘山、渭河等具有走滑、伸展性质的盆地。鄂尔多斯盆地是多类型资源同盆共生的富油气盆地^[1], 其油气资源基础在国内大盆地中具有明显的优势^[2], 自 1907 年开始勘探, 已发现 67 个油气田。

鄂尔多斯盆地周边矿权空白区内油气勘探起步较早, 一般在 20 世纪 50—60 年代开始就逐步完成了重力、磁法、电法普查及露头地质调查工作, 确定了盆地边界, 划分了盆地隆拗结构, 对区内生烃层系与油气条件有了初步的认识。

20 世纪 90 年代开始, 进入油公司集中勘查阶段, 部署实施了大量的二维地震和参数井、预探井,

进一步查明了区内地层发育与分布情况, 普遍揭示了油气源岩和良好的储层。例如发现了银川盆地银参 1 井清水营组油砂; 河套盆地呼和拗陷呼参 1 井、和 1 井等在渐新统浅层获得生物气气流, 产气量最高为 $121.2 \text{ m}^3/\text{d}$, 临河拗陷完钻 9 口井, 在渐新统见含油显示, 临深 3 井下白垩统累计出油 24.84 m^3 ; 鄂尔多斯盆地渭北隆起耀参 1 井在奥陶系获得低产气流; 渭河盆地渭新 1 井发现水溶氦气显示; 六盘山盆地地面与井下发现大量白垩系油气苗, 盘探 3 井在深部层系发现荧光级别显示^[3-5]。这一阶段的勘探虽然发现了众多油气显示, 但没有突破油流关, 主要原因在于区内黄土塬、沙地、高大山地等复杂地形地貌制约物探资料质量, 影响了对目标圈闭的准确落实; 其次, 早期的钻井深度普遍较浅, 较少揭示盆内完整的储盖组合, 尤其对深部油气系统无法企及。试油气工艺技术也是影响油气发现的重要因素, 限于当时的试油气技术, 一些重要的油气信息未能及时和完整地提取。

鄂尔多斯盆地周缘及外围盆地空白区蕴含丰富的

油气及氦气、生物气、地热能等油气共伴生资源是勘探已证明的客观事实, 历次资源评价均认为空白区资源潜力可观^[6-9], 因此需要加深研究和评价力度, 不断提出新矿权, 充实国家出让区块储备库, 以保障油公司充足的勘探开发空间与可持续化发展。针对鄂尔多斯盆地周缘及外围盆地尚未开展系统选区评价的情况, 为适应油公司在这些地区拓矿权的迫切需求, 本文在大量的区调报告、油气地质志、矿产志、勘探资料及文献报告中检索有用信息, 并且密切跟踪全区油气勘探进展, 及时总结地质新认识, 结合空白区分布, 解读国家矿权净矿出让、竞争性出让等相关政策, 聚焦空白区油气地质条件的再认识与潜

力评价, 在空白区中优选有利区, 为新矿权的出让提供地质依据与评价参考。

1 鄂尔多斯盆地空白区矿权拓展有利方向

目前, 鄂尔多斯盆地油气矿权面积为 $21.178 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其余地区基本被生态红线区、环保区覆盖(图1), 生态保护区在盆地各个地区均有分布, 主要是各类水源保护地、防风固沙林、珍稀动植物保护区、湿地、湖泊、水库及城建区等, 如宁夏哈巴湖、贺兰山草场、内蒙古红碱淖、陕北子午岭、黄龙山等国家级的自然保护区, 按照现行国家环保政策, 这些地区属于禁止从事油气勘探开发活动的范围。

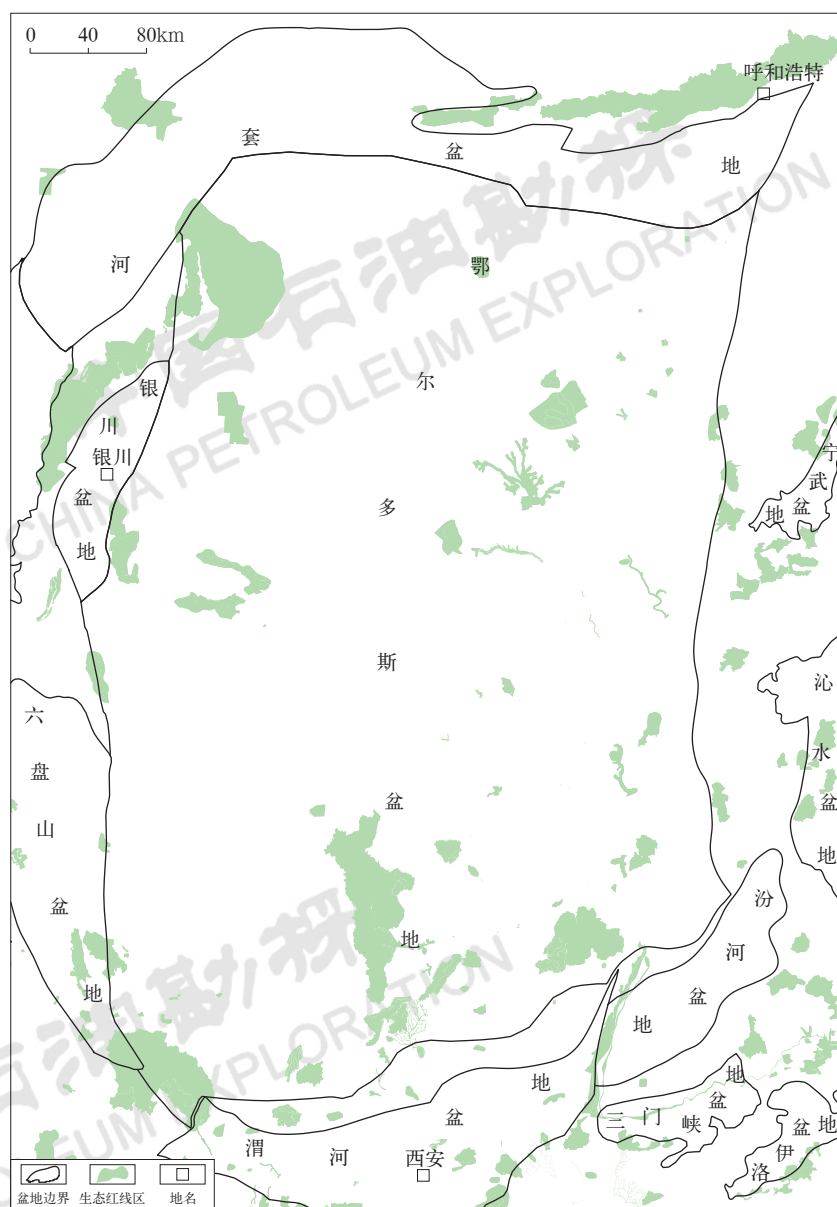


图1 鄂尔多斯盆地及外围盆地生态红线分布图(数据截至2022年底)

Fig.1 Distribution of ecological red lines in Ordos Basin and its surrounding basins (data as of the end of 2022)

除生态红线区外,鄂尔多斯盆地周缘及外围盆地约有 $10.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 矿权空白区,主要分布在盆地北缘伊盟隆起杭锦旗、东胜至乌海地区、盆地南缘渭北隆起至渭河盆地北斜坡过渡带、盆地东缘中段万镇地区、盆地西缘冲断带,以及周边的银川盆地、渭

河盆地、河套盆地临河坳陷、呼和坳陷与六盘山盆地。根据国家矿权管理政策,到期勘查区块将缩减许可证载明面积的 20%,未来还会逐步形成大量新的空白区,这些空白区构成了油公司拓展新矿权的基本范围,也是本文研究的主要范围(图 2)。

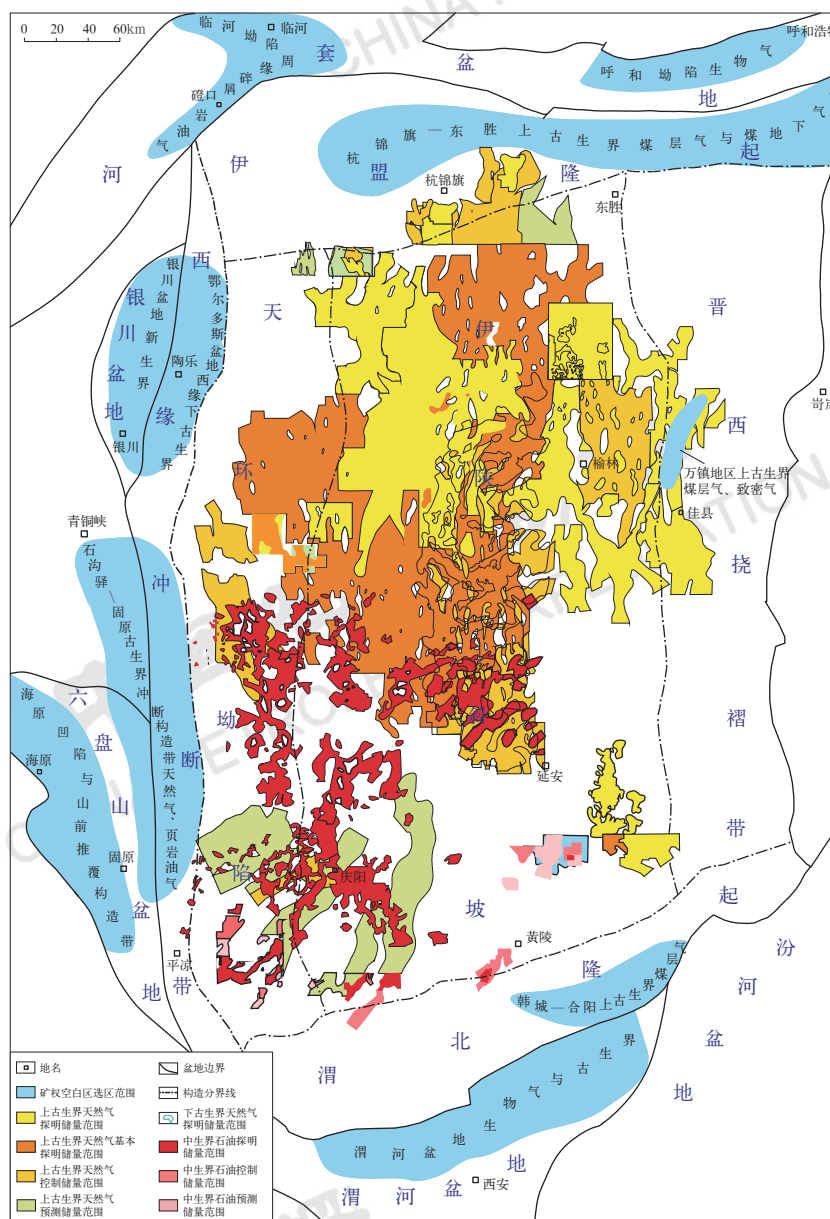


图 2 鄂尔多斯盆地周缘及外围空白区选区评价范围图

Fig.2 Screening and evaluation scope of mining rights blank zones in the peripheral Ordos Basin and its surrounding basins

1.1 盆地东缘

鄂尔多斯盆地东缘主探上古生界石炭系—二叠系致密气、煤层气。作为供烃主力的本溪组、太原组、山西组煤层,累计厚度为 10~26m,有机碳含量高,煤岩

R_o 普遍大于 1.5%,生烃强度介于 $(28 \sim 40) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (图 3),整体具有充沛的供烃势^[10]。与盆内相比,盆地东缘构造稳中有变,但更具活动性,纵向上具有源内、近源和远源多种成藏组合,含气层也明显比盆内多。除致密气、煤层气外,深层煤层气资源也很丰富,

估算深层煤层气资源量达 $10.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。随着临兴地区深煤1号井等深层煤层气的突破,深层煤层气领域已逐步成为勘探开发的新方向^[11-12]。目前盆地东缘北段的保德、神府,中段的三交、临兴、石楼西,南段的大宁—吉县、乡宁、韩城地区,均提交了煤层气或致密气探明储量,临兴气田也发现了千亿立方米整装探明储量^[13-14]。

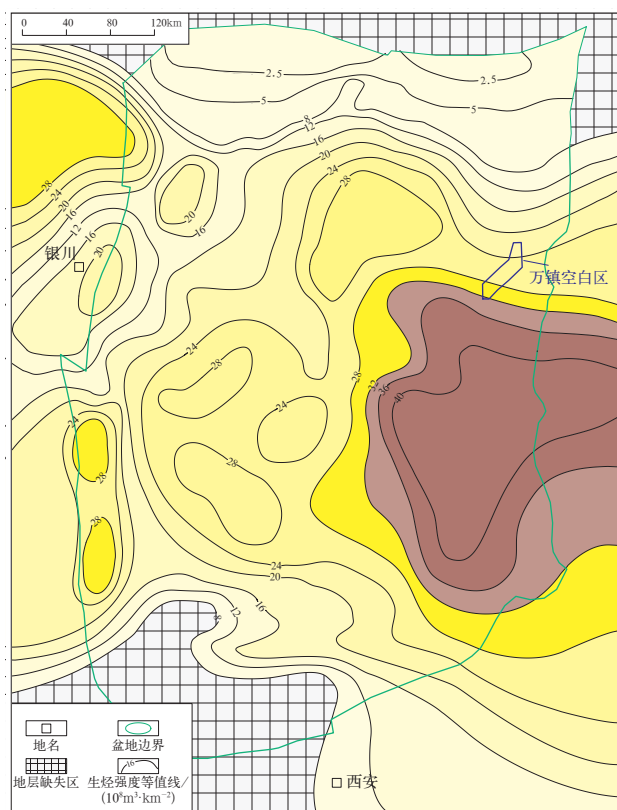


图3 鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩生烃强度图

Fig.3 Hydrocarbon generation intensity of the Upper Paleozoic source rock in Ordos Basin

东缘中段万镇空白区沿黄河两岸分布,面积约为 300km^2 ,主要在陕西省境内。该区构造形态为西倾单斜,平均倾角不足 1° ,发育小型鼻隆,幅度在 $22 \sim 34 \text{m}$ 之间,断裂不发育。万镇空白区包含在盆地东缘大型连片含气区之中,周边已经发现了神木、米脂、临兴三大气田。万镇地区发育上古生界厚煤中心,太原组—山西组煤层累计厚度为 $10 \sim 22 \text{m}$,上古生界烃源岩生气强度平均为 $30 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$,烃源条件优于周边的神木、米脂气田,与东侧临兴气田相当。区内主要目的层由下石盒子组—山西组大型三角洲平原—前缘河道砂体及太原组潟湖、潮坪相石灰岩构成,砂体厚度平均为 $5 \sim 30 \text{m}$,累计厚度可达 75m ,岩性致密,属低孔—特低孔、低渗储层,多套储集体

叠合发育,埋深在 $2000 \sim 2200 \text{m}$ 之间。万镇周边气藏类型以侧向岩性遮挡形成的近源岩性气藏、构造—岩性气藏为主,上覆完整的盖层,对气藏具有良好的封盖作用。根据邻区气田生产资料,推测万镇地区致密气单井产量在 $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 左右。

下古生界盐下及深层煤层气是盆地东缘的新领域,万镇西北部米脂凹陷米探1井在奥陶系盐下获 $35.24 \times 10^4 \text{m}^3$ 高产气流(压裂后无阻流量)^[15],证实了盐下自生自储型气藏的有效性,盐下勘探潜力逐渐显露,但万镇地区盐下领域目前缺乏实物资料,其潜力以推测为主。

深层煤层气勘探在盆地东缘发展迅速,万镇南部大宁吉县地区(2000m 以深)、东侧临兴(深度近 3000m)、北部大牛地(深度近 3000m)均获突破。东缘8号煤层和5号煤层埋深大于 1500m 的面积达 $5.7 \times 10^4 \text{km}^2$,按浅层已知储量丰度 $2.5 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 预测,估算深层煤层气资源量 $10.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。万镇空白区山西组、太原组主力煤层全面覆盖,煤岩 R_o 为 $1.1\% \sim 1.7\%$,为中—高煤阶。类比邻区佳县钻井实测现场解析含气量在 $9.41 \sim 21.94 \text{m}^3/\text{t}$ 之间(平均为 $14.57 \text{m}^3/\text{t}$),推测万镇地区深部煤层应有较高的游离气含量,具有优良的煤层气物质基础。万镇地区煤层埋深在 2000m 左右,处在国内深层煤层气有效勘探范围内。综合上述分析,万镇空白区面积虽小(300km^2),但具有致密气、深层煤层气及奥陶系盐下立体勘探潜力,属于“小而肥”有利区,因此,万镇空白区可全面规划为新矿权(图3)。

1.2 盆地南缘

本文研究的鄂尔多斯盆地南缘是指渭北隆起主体部分,即东起韩城,中经铜川、耀州,西至灵台县、陇县与六盘山相接的狭长地带。盆地南缘因燕山期以来强烈的构造运动,形成复杂的冲断构造,致使古生界不同程度地冲出地表,塑造出峻峭的北山地貌景观,将陕北黄土高原与关中平原截然分开。以前针对下古生界的耀参1井、旬探1井、平1井、淳2井等钻井大部分产淡水,仅麟探1井、耀参1井在平凉组分别获得 $110 \text{m}^3/\text{d}$ 、 $242 \text{m}^3/\text{d}$ 微量气,个别井在中上寒武统一奥陶统碳酸盐岩储层中见沥青、油浸痕迹,这批井的钻探效果,足以说明盆地南缘常规油气是缺失有效保存条件的,目前南缘油气勘探已处于停滞状态。但渭北隆起耀州、铜川、合阳、韩城一带残留大面积的石炭系—二叠系煤层,被煤工业界誉为渭北

“黑腰带”,是关中地区煤炭工业的基础^[16-17],煤层气资源的物质基础也因此而奠定。目前渭北隆起主要被常规油气矿权覆盖,煤层气矿权分布在韩城、耀州两个地区,韩城已经建成煤层气田,进入开发阶段。耀州已有地方公司勘查煤层气。

通过渭北煤层分布与矿权分布的叠合分析,发现合阳地区具有一定煤层气勘探条件,区内实施了合1-1井、1-2井、1-3井、1-4井、1-5井,单井最高产气量达 $1600\text{m}^3/\text{d}$ 。合阳与韩城同属一个构造单元,构造形态呈一微波状起伏的北倾单斜,倾角为 $3^\circ\sim 10^\circ$,构造稳定。主要含煤地层为山西组5号煤层和太原组11号煤层,平均厚度均超过5m。5号煤层埋藏深度为600~1600m,11号煤层埋藏深度较5号煤层深40~50m。整体上主力煤层埋藏深度适中,工程技术适应性好,有利于煤层气的勘探开发。煤层的镜质组反射率为 $1.60\%\sim 2.19\%$,整体已进入大量生气阶段。5号煤层分布范围较广且连续性好,煤层气质量体积一般为 $3.00\sim 13.68\text{m}^3/\text{t}$,含气量与韩城、乡宁煤层气田相当。

合阳地区盖层条件优越,从太原组到上石盒子组发育多层泥岩,突破压力为10~18MPa,封闭性较好,顶板岩性主要为灰黑色泥岩、泥质砂岩和碳质泥岩,厚度为5~10m,分布比较稳定,可以作为直接盖层。煤田地质资料显示合阳地区煤层埋藏深度600~1300m的含煤面积为 225km^2 ,按照煤层气储量计算规范,可采资源量为 $335.01\times 10^8\text{m}^3$;煤层埋藏深度1300~1600m的含煤面积为 55km^2 ,可采资源量为 $86.68\times 10^8\text{m}^3$ ^[16]。通过上述煤层气静态指标评价及与邻区煤层含气量、单井产量的类比,可以看出合阳地区具有一定的煤层气勘探开发条件,可设置新的煤层气矿权,部署开发试验井组,进一步评价煤层气产能,激发渭北隆起新领域煤层气的勘探活力,弥补常规油气资源不足的缺憾。

1.3 盆地北缘

鄂尔多斯盆地北缘东起准格尔旗黑岱沟煤矿,向西经鄂尔多斯市北部,穿库布齐沙漠直至乌海市,是鄂尔多斯盆内面积最大、分布最连片的一块空白区。这一地区主体处在鄂尔多斯盆地伊盟隆起之上,向北以平缓的斜坡和逐渐降低的断阶延入河套盆地,是鄂尔多斯盆地与河套盆地的构造过渡带,也是河套平原与鄂尔多斯高原的自然地理过渡带。伊盟隆起西端乌海地区构造较破碎,在桌子山一带出露前寒武系至二

叠系,附近建有乌海煤矿工业基地,乌海市东部有一片国家级自然保护区;伊盟隆起东端准格尔旗、伊金霍洛旗一带出露二叠系—三叠系,区内有著名的黑岱沟煤矿。

盆地北缘空白区以往主探石炭系—二叠系致密砂岩气。20世纪80—90年代,伊12井等钻井揭示上古生界含气性较差,地层水矿化度较低,在黑岱沟、暖水沟、巴则马岱等地区又发现诸多油苗,认为伊盟隆起目的层被抬升至近地表,保存条件受损严重,在随后的几十年里,再无勘探投入。实际上,盆地北缘的勘探潜力有再认识的空间,主要原因是:(1)伊盟隆起中段除公卡汉凸起、什股壕凸起、乌兰格凸凸起缺失石炭系—二叠系目的层外,其余地区上古生界烃源岩仍有分布(图4),其中杭3井钻遇山西组—太原组暗色泥岩21.4m,同时钻遇煤层,在石盒子组5段钻遇含气砂岩;铁1井在本溪组、太原组、山西组1段、石盒子组8段等层段试气获低产气流,气源来自上古生界煤系地层。主力储层山西组、石盒子组砂岩大面积分布,杭3井在石盒子组5段钻遇含气砂岩,石盒子组、山西组砂体厚度为10m左右,说明杭锦旗地区具备基本成藏条件,可进一步勘探致密砂岩气。

(2)大量的煤田钻孔、露头剖面与钻井资料均反映盆地北缘残留大面积煤层,这为新兴领域煤层气的勘探提供了保障,也指明了盆地北缘勘探的新方向。煤层气在盆地北缘以往未被重视,主要以瓦斯气形式存在于煤矿中,危害煤矿生产安全。据煤田资料,准格尔煤矿周围太原组和山西组煤层合计厚度一般有60m,5号、6号、9号为主要可采煤层,6号煤层发育最稳定,平均厚度为42.12m,埋深在800~1000m,因埋藏深度不如盆地本部深,煤阶整体处于中等偏低演化程度,煤田钻孔实测含气量为 $2\sim 6\text{m}^3/\text{t}$,达到了国内低阶煤层气选区评价标准。遗憾的是,杭3井一带因缺乏详实的煤岩研究资料,暂时无法作进一步评价。今后若能再部署工作,进一步落实煤岩分布,可以开展煤炭地下气化先导实验(UCG)^[17-18],优选煤化工有利目标区,综合利用煤系气资源。

以上论述可以看出,盆地北缘空白区面积大,但地层结构比较复杂,尤其煤层的分布没有得到准确落实,建议规划两个大勘查区,覆盖从东到西的所有空白区,部署二维地震侦查线或浅钻,进一步查清区内地层结构与煤岩分布,夯实北缘空白区资源基础,为优选有潜力的新区块创造条件。

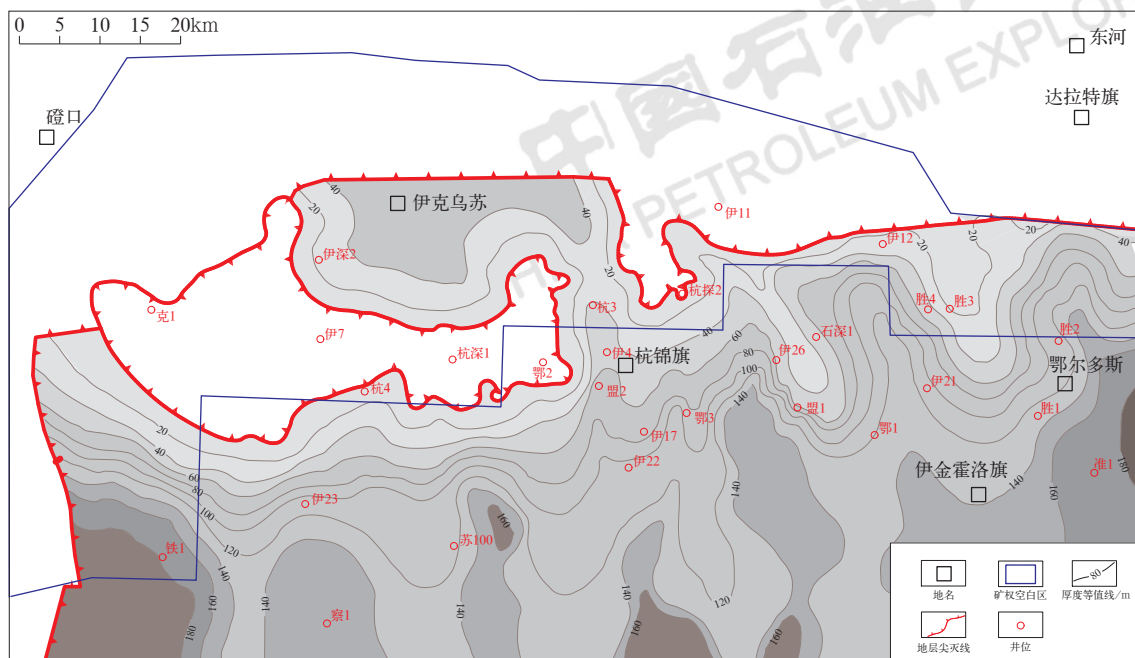


图4 鄂尔多斯盆地北缘太原组—山西组煤层+暗色泥岩厚度图

Fig.4 Thickness map of coal seam and dark mudstone in Taiyuan–Shanxi Formation in the northern margin of Ordos Basin

矿权空白区中部伊克乌苏一带残留大面积煤系地层

1.4 盆地西缘

鄂尔多斯盆地西缘夹在阿拉善地块、鄂尔多斯地块及北祁连褶皱带之间,与盆地本部主要受华北海控制不同,西缘的构造演化与沉积充填很明显更多地受古祁连洋的影响,古生代属于贺兰—祁连海沉积区,中生代早中期属于陆相大鄂尔多斯盆地的西部,晚侏罗世开始遭受挤压冲断,形成南北向构造变形带,早白垩世以后逐渐分化解体,新生代晚期在挤压冲断及伸展走滑双重构造作用下,逐渐定型为现今构造格局:北段表现为一束狭长、紧闭的冲断、推覆构造带,中南段六盘山地区仍以冲断、推覆构造为主,平面上组合形成弧形构造带。

盆地西缘烃源岩条件较好,该地区在早古生代长期处于祁连海与华北海交接带,持续接受海相沉积,其水体自东向西逐渐加深,发育一套以台地相和陆缘斜坡相为主的海相地层,其中硅质泥棚硅质含量高,页岩发育,为有利微相^[19],形成了乌拉力克组海相烃源岩(图5)。在盆地西南缘,这套地层对应平凉组下部地层。晚古生代至中生代,在整体陆内坳陷的沉积背景下又形成了海陆相煤系烃源岩及湖相烃源岩。乌拉力克组作为西缘地区主力烃源岩,岩性以黑色页岩为主,北段较厚,一般为60~140m,中南段

一般为40~100m,优质烃源岩集中发育在乌拉力克组底部(乌三段),TOC一般为0.43%~1.52%,平均为0.86%;干酪根类型以I、II₁型为主;有机质成熟度在西缘南、北段有明显差异,北段R₀一般为1.2%~1.9%,以生气为主;南段R₀一般为0.72%~1.25%,油气兼生,以生油为主。乌拉力克组分布范围覆盖了北起乌海桌子山、南至银洞官庄的广大地区,为盆地西缘油气的形成奠定广泛的物质基础。而且这套海相烃源岩的成藏有效性已经得到证实,忠4井、惠探1井、银探3井等17口探井获油气流,详细的地球化学分析显示这些油气与乌拉力克组烃源岩有直接的亲缘关系^[19]。

近期李86井试气获天然气15.22×10⁴m³/d,银探3井在乌拉力克组硅质页岩中试油获石油5.3t/d、天然气1013m³/d,具有页岩油特征,这一发现证实了西缘海相烃源岩的可靠性,也显示出乌拉力克组相对低熟的页岩油的勘探前景。

目前盆地西缘发现的油气在平面上呈现“多点开花,有藏无田”的特征,构造控藏的特点明显。由于燕山中晚期以来强烈的逆冲推覆活动,使西缘的油气系统遭到大面积的破坏,因而在冲断前锋带的局部构造上仅残存少量断背斜型油气藏,如胜利井、李庄子、摆宴井、惠安堡等一些小型油气田。但在宽缓的向斜

构造区及主冲断层下盘原地岩体, 古生界构造破坏程度相对较低, 仍有可能发现规模油气藏, 如西缘北段空白区的陶乐断阶带、横城断阶带一带, 以及南段的石沟驿向斜。

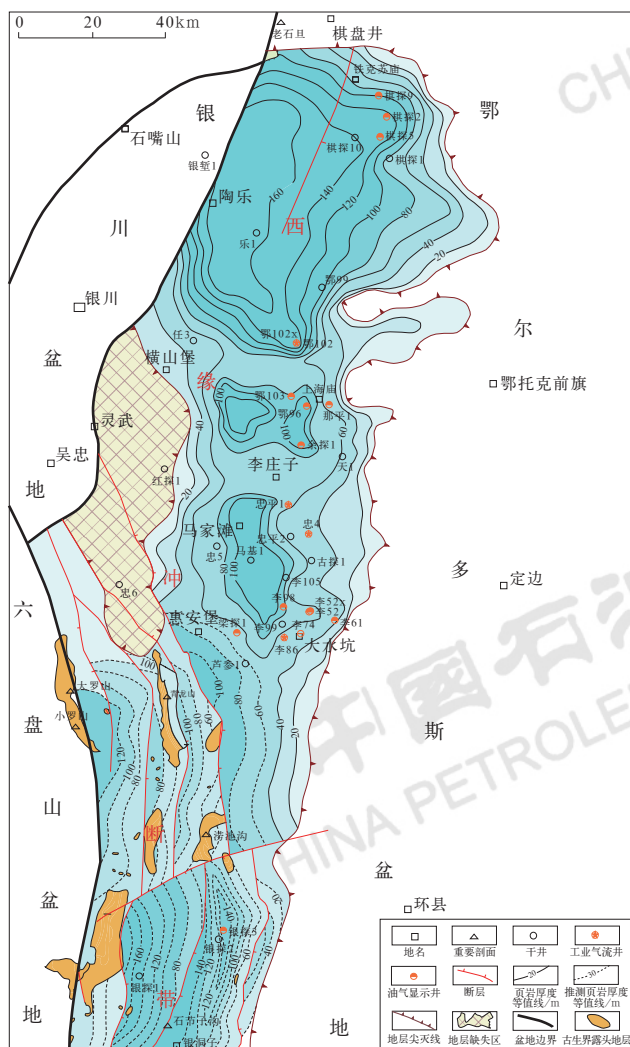


图5 鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组页岩厚度图

(据文献[19]修改)

Fig.5 Thickness map of Ula Formation shale in the western Ordos Basin (modified after reference [19])

2 外围盆地矿权拓展有利方向

2.1 六盘山盆地

六盘山盆地基本为矿权空白区, 有多口探井钻穿中浅层地层, 油苗显示很多但没有工业油气, 对深部油气潜力尚无清晰的认识。六盘山盆地的地层结构与构造行迹在平面上为呈北西—南东向的弧形。由固原往北经大罗山至石沟驿地区, 一些深反射地震资料与

重磁成果反映地层格架及残留地层与鄂尔多斯盆地西缘很相似^[9,20-22], 古生代时期, 六盘山盆地与鄂尔多斯盆地西缘同处于陆缘斜坡海相沉积与古地理环境, 推测发育相近的、有利的原生油气条件。

六盘山盆地以往主要勘探白垩系, 发现海原凹陷、固原凹陷是盆地的主要生烃凹陷, 古近纪之前, 沉降中心与沉积中心基本一致, 均为继承性凹陷, 盘中2井、盘浅3井、盘浅4井见到沥青和液体原油^[22], 一定程度揭示了中浅层油气系统, 未取得突破的原因在于受盆内分割性断陷的控制, 中浅层烃源岩分布较局限且热演化程度不够。

有研究认为, 六盘山盆地三叠纪时期与鄂尔多斯盆地为统一的大湖盆^[23], 虽然揭示三叠系钻井较少, 但周边露头及盘探3井已经发现上三叠统延长组烃源岩及与延长组烃源岩有亲缘关系的油气显示, 煤田钻孔发现了侏罗系湖相烃源岩, 为六盘山盆地深部油气勘探提供了线索。重力资料也反映六盘山盆地深部发育较厚的三叠系, 推测有可能存在与鄂尔多斯盆地西南缘庆阳—镇原—环县三叠系相连通的油气系统。勘探深部层系的有利条件在于: 在早期断陷盆地晚期前陆冲断构造转换过程中, 深部构造整体变形相对较弱, 使油气运、聚仍具较好的空间配置。断层的先正后逆对油气藏的形成起到很好的通源作用, 生油凹陷之上, 有利于油气的聚集成藏, 围绕生烃凹陷的正向构造带及与生烃凹陷叠置的盆缘推覆体是有利的勘探目标。

2.2 河套盆地

河套盆地为中—新生界断陷盆地, 主要经历了早白垩世弱伸展拗陷、古近纪差异伸展断拗、新近纪强烈伸展断陷、第四纪走滑(或反转)改造的成盆演化过程。盆地最大的次级单元临河拗陷发育白垩系固阳组(K_1g)、古近系临河组(E_3l)两套烃源岩, 厚度最大为1400m, 分布面积大, 覆盖临河拗陷大部分地区(图6)。临河组烃源岩有机质丰度整体较高, TOC平均约为1.5%、生烃潜量平均超过6mg/g; 固阳组烃源岩有机质丰度中等偏高, TOC一般为1.9%、最高为2.37%, 两套烃源岩有机质类型均以 II_1 — II_2 混合型为主^[24-27]。

临河拗陷固阳组和临河组发育扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊3种沉积体系。盆地西部主要发育冲积扇入湖后形成的扇三角洲沉积体系, 以巨厚砂砾岩沉积为主, 可形成厚度大、粒度粗的储层; 东部发育多

个浅水大型辫状河三角洲沉积体系,以砂泥互层沉积为主,主要为水下分流河道的中—细砂岩型储层;湖泊体系发育滩坝砂岩及混积岩型储层,主要见于盆地中部。由于地层埋藏快,河套盆地储层压实和成岩演化相对滞后,储层弱成岩保孔特征明显,如临华参1井固阳组近5000m处砂岩孔隙度为17%、渗透率为200mD,河探1井临河组砂岩6195m处孔隙度为14.6%、渗透率为42.9mD,根据古近系、白

垩系孔隙度—深度演化趋势,推测超过7000m仍发育有效储层。临河组储层以中孔、中渗型为主,保证了油气高产稳产,临华1X井、河探1井等单井产量一般超过100m³/d。近期,环生烃凹陷(临河拗陷)分布的正向构造带如吉兰泰、兴华等地区相继发现整装亿吨级油田。据最新资源评价,临河拗陷石油地质资源量为6.47×10⁸t,是鄂尔多斯外围盆地中最具资源潜力的地区。

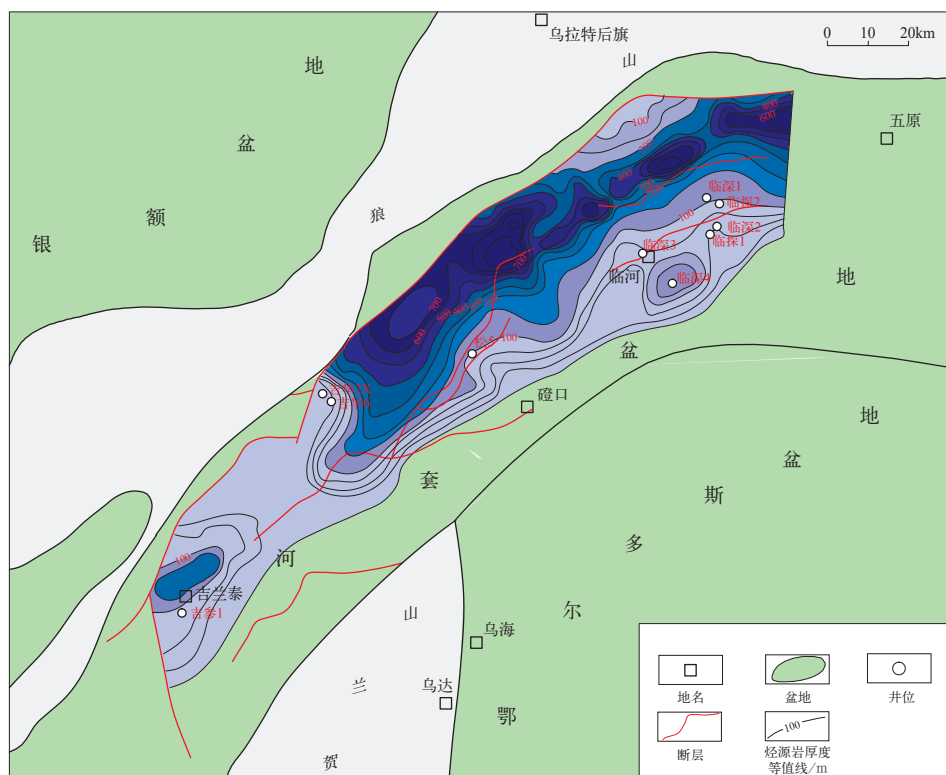


图6 河套盆地固阳组烃源岩厚度分布图(据文献[27]修改)

Fig.6 Thickness map of Guyuan Formation source rock in Hetao Basin (modified after reference [27])

临河拗陷油气富集的基本特点是油气围绕环凹构造带与高部位分布。临河拗陷东南断阶带空白区与临河拗陷主体结构相似,主探层系完整,发育固阳组、临河组原地烃源岩,并发育多组深切的走滑断层,油气通源性良好,且临近生油洼槽,处于油气优势运聚方向,多种构造圈闭与白垩系、渐新统生油岩配置有利,成藏条件较好。与空白区最近的临华1X井日产油306m³,地震资料显示临华1X井所在的圈闭向东延入空白区,临华1X井距矿权空白区边线仅3~4km,可以推断空白区与临华1X井区为一个统一的含油构造(图7),油气充注极有可能越过边线进入空白区,因此围绕临河拗陷高产井含油构造的空白区是最有利的勘探方向。鉴于临河拗陷优越的烃源基础和油气高产条件,理应围绕生烃洼槽分

布的空白区提出新的矿权,进一步扩大临河拗陷油气勘探场面。

河套盆地呼和拗陷全部为矿权空白区,是一个北深南浅的箕状断陷,沉积了下白垩统、古近系、新近系及第四系,地层累计厚度达7000m。其中白垩系因深度大、缺乏有效烃源岩,不作为勘探目的层;第四系更新统、新近系上新统富含生物气,是呼和拗陷主要的资源类型。以往研究表明呼和拗陷具有生物气成藏条件;第四系、上新统气源岩总厚度在1200m以上;气源岩有机碳含量平均为0.59%,有机质类型为混合型及腐殖型,处于生物化学生气阶段,具有大规模生气能力。以往在油气探井及众多水文浅井见很多明显的气测异常^[28],但试气产量较低(和1、呼参1等6口井产气量为3~121.2m³/d)。没有突

破的主要原因是受限于勘探程度、地震资料品质及钻井工程工艺技术,盆地的发育演化及生物气资源有利区优选与圈闭得不到准确落实。

已有研究显示,呼和坳陷的地温梯度为 $2.96 \sim 3.13^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,第四系正处在有利于生物气产生的

温度带;钻井发现第四系埋深 600m 以下地层水为微咸水—咸水,温度超过 25°C ,有利于产甲烷菌的繁衍及生物气的形成;广泛分布的芒硝层可有效抑制产甲烷菌及喜氧微生物的繁衍及活动,也有利于有机质保存。

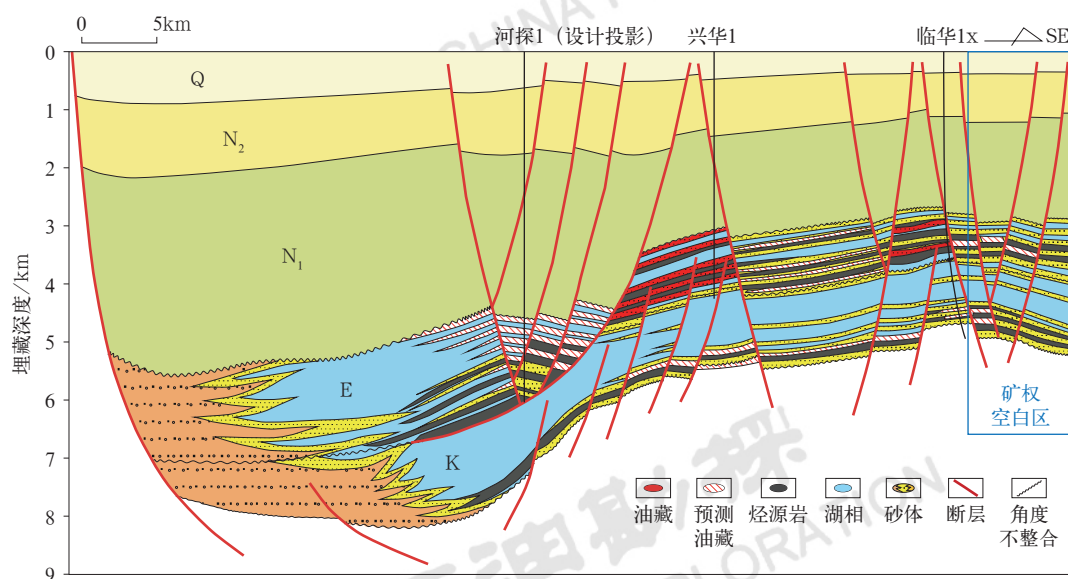


图7 河套盆地临河坳陷兴隆构造带油藏模式图(据文献[24]修改)

Fig.7 Oil accumulation pattern in Xinglong structural belt in Linhe Depression, Hetao Basin (modified after reference [24])

矿权空白区也是临河坳陷东南断阶带油气运移的指向区

呼和坳陷生物气的生气强度、生气量、有机碳含量等关键成藏条件与柴达木盆地相近^[7,29]。据估算,呼和坳陷生物气资源量约为 $4000 \times 10^8 \text{m}^3$,有很大的勘探前景^[7,28]。有利区应为呼和坳陷北倾斜坡的低幅构造及岩性圈闭。下一步应以第四系及上新统为目的层,通过高分辨率地震资料的采集、处理及解释,对呼和坳陷生物气成藏条件形成整体认识后再寻求突破,解放呼和坳陷生物气资源。

2.3 银川盆地

银川盆地为夹持在贺兰山与鄂尔多斯盆地西缘冲断带之间的断陷盆地,盆地东西两侧以正断层与邻区分开,目前盆地全部为矿权空白区。盆内已经发现至少8个局部构造,钻井揭示了古近系清水营组(E_3q)暗色泥岩,银参1井在清水营组发现油砂显示。银川盆地发育4个沉降中心,盆地北部基底最深 9800m ,南部最深约 5300m ,清水营组厚度为 $1800 \sim 3000\text{m}$ 。银参1井揭示清水营组上部地层 647m ,岩性主要为灰绿色、灰色、深灰色泥岩夹砂岩,暗色泥岩厚度为 515.9m ,

银参1井清水营组有机碳含量为 $0.47\% \sim 0.50\%$,氯仿沥青“A”含量为 0.0797% ,与中国古近纪主要含油气盆地各项生油指标相比,银参1井渐新统具有生油条件,且银参1井在新近系录井岩屑中发现10颗含油岩屑,说明盆地曾发生过油气的生成和运移。结合清水营组露头沉积特征、地震反射特征及钻井揭示的岩性组合,推测清水营组中、下部深湖相暗色泥岩集中段,有机质丰度、成熟度应比已发现的上段泥岩高,可能为有利的生油层段。

银参1井清水营组泥岩地球化学指标显示泥岩中有机质主要为湖相还原环境的藻类形成的有机质,且有咸化湖相特征^[30]。古近系为含有膏岩及大套暗色泥岩的咸化湖泊沉积,咸化湖相烃源岩一般具有中等—较高丰度的有机质、优质干酪根和有机质向烃转化率高特征,这与河套盆地白垩系、古近系高产率烃源岩特征相似。

银川盆地平均地温梯度为 $3.0^{\circ}\text{C}/\text{km}$,与济阳坳陷($3.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$)相近^[30],清水营组生烃史可能与济阳坳陷沙河街组三段相似,有大量生烃的可能。

研究表明银川盆地生油门限深度为3110~3310m, 温度为103.3~109.3℃; 大量生油深度为4700m, 液态窗分布在320~5500m之间^[6]。综合物探资料, 盆内灵武凹陷、银川北凹陷、常信凹陷和平罗凹陷均处在有利的生烃范围, 推测清水营组成熟生油岩面积大于2000km²。借鉴河套盆地临河坳陷勘探成功的启示, 推测围绕成熟生烃凹陷分布的正向构造带是有利的勘探目标区。

2.4 渭河盆地

渭河盆地属于新生代断陷盆地, 新生界厚7000m, 固市、西安两个凹陷地层厚度最大, 但主要是一套红色碎屑沉积, 仅上新统张家坡组发育较厚的深灰色、绿灰色层系。盆地北部斜坡区残留长城系、寒武系—奥陶系及二叠系等原属于华北地台的地层。渭河盆地基本上为矿权空白区。

渭河盆地新生界蕴藏着丰富的地热水、氦气、生物气及油气资源, 其中生物气集中在上新统张家坡组, 氦气与地热水在灞河组、高陵群与白鹿塬组共生共存。地热井和地球化学资料显示张家坡组是生物气的主要产层, 甲烷碳同位素值为-65.0‰~-62.7‰;

中新统灞河组和高陵群是地热水的主要产层, 伴生少量甲烷气和氦气, 甲烷气具煤型气特征^[31]。渭深13井在井深2340~3001m发现12个组(段)的气测异常, 试气获日产气208L/d, 含氦浓度高达2.13%~4.14% (平均3.056%), 达到了工业标准。渭河盆地当前资源利用主要集中在地热水领域^[9], 生物气与氦气也有发现, 但未取得产能突破。

制约渭河盆地油气勘探的主要矛盾是缺乏好烃源岩^[32], 张家坡组沉积时水体较浅, 仅有短暂的半深水—湖相沉积, 暗色泥岩有机碳含量为0.21%~1.17%, 平均为0.49%, 整体较低, 热演化程度也低, 总体处于细菌降解生物气形成阶段, 是良好的生物气源岩。平面上, 张家坡组的暗色泥岩在固市凹陷最为发育, 暗色泥岩单层厚度一般为5~20m, 最厚147m, 累计厚度近800m (图8)。就生物气藏的气源岩条件而言, 固市凹陷好于西安凹陷, 张家坡组沉积期湖盆的中心靠近渭河断裂一侧, 主体位于固市和渭南之间, 是生物气气源的主要发育区, 渭南地区已有多口地热井见到含气显示^[31]。今后应围绕固市凹陷张家坡组半深湖相开展生物气的钻探工作, 有可能获得工业性气流。

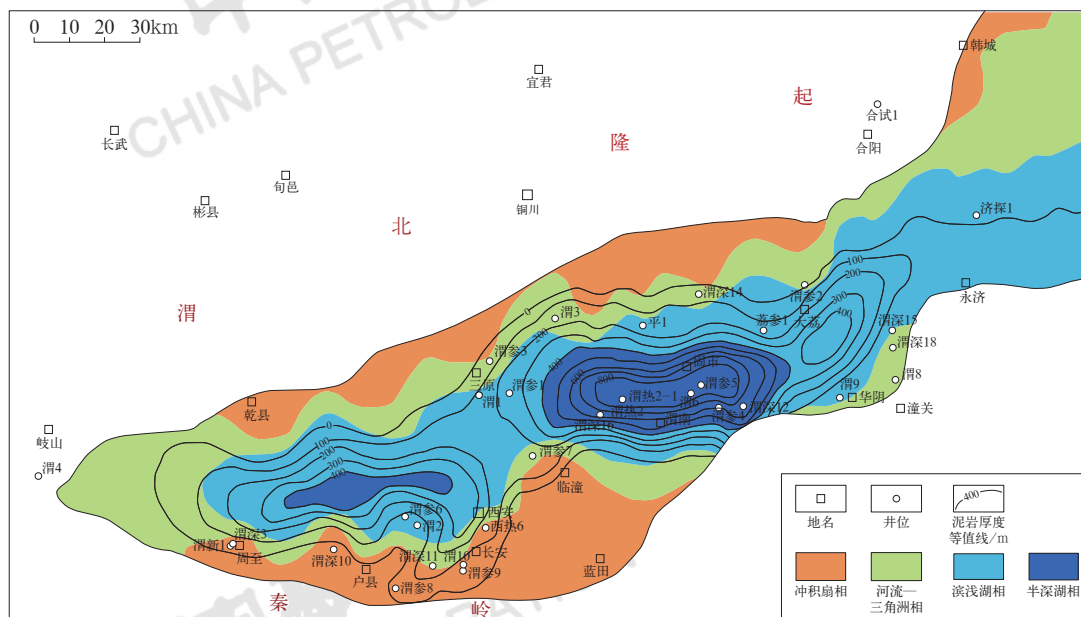


图8 渭河盆地上新统张家坡组泥岩厚度图

Fig.8 Thickness map of Zhangjiapo Formation mudstone in the Upper Neogene in Weihe Basin

渭河盆地古近系与上古生界是潜在的勘探层系, 但勘探程度很低。渭深10井见到薄层煤系地层, 中新统高陵群、灞河组地热水溶气地球化学指标显示有煤成气特征。有研究表明, 渭河盆地内沉积过大范围

的上古生界, 但多次构造运动后, 现今残留的上古生界主要位于西安凹陷和固市凹陷内, 固市凹陷中煤系地层厚度较西安凹陷大, 且厚度较大位置靠近南部^[32]。渭河盆地北部斜坡与渭北隆起之间过渡的富平—蒲城、

合阳—蒲城一带，石炭系—二叠系也有残留分布，渭参3井钻遇74.92m石盒子组。一些地热钻井发现甲烷含量较高的气层，浅层生物气源、深层高热演化气源及煤岩气源均有贡献，主要证据是甲烷碳同位素值为 $-40.2\text{‰} \sim -24.5\text{‰}$ ，重烃含量低，与鄂尔多斯盆地上古生界煤型气相似，说明下伏石炭系—二叠系含煤地层的生气潜力与供烃作用不容忽视。石炭系—二叠系是鄂尔多斯盆地天然气主力产层，若能加深渭河盆地基底与残留地层分布的认识，则可进一步明确渭河盆地石炭系—二叠系勘探潜力。

3 鄂尔多斯盆地周缘及外围盆地潜力矿权的提出

本文通过系统研究和类比分析，梳理出鄂尔多斯盆地东缘万镇上古生界致密气与深层煤层气，南缘合阳上古生界煤层气，北缘准格尔旗—杭锦旗—乌海上

古生界致密气与煤层气，西缘陶乐断阶带、石沟驿向斜常规天然气，以及六盘山盆地海原—固原凹陷三叠系—侏罗系深层油气，河套盆地临河坳陷周缘常规油气、呼和坳陷生物气，银川盆地平罗凹陷常规油，渭河盆地西安凹陷、固市凹陷生物气等较有潜力的勘探方向和领域，这些领域具有较好的油气成藏条件和资源前景，但主要因为勘探程度低，其油气潜力未被真正揭示。因此，本文根据客观地质条件的评价，综合考虑资料与认识的可信度、地表条件、生态环保等因素，在上述有利区内优选出10个新矿权（图9、表1），面积约为 $2.68 \times 10^4 \text{km}^2$ 。根据10个新矿权各自成藏条件、资源潜力及地表条件的类比，认为围绕河套盆地临河坳陷的3个区块及鄂尔多斯盆地东缘万镇地区2个区块最为有利，是空白区中矿权出让的首选目标；其余5个区块为第二层次储备区块，在有条件的情况下可以出让。

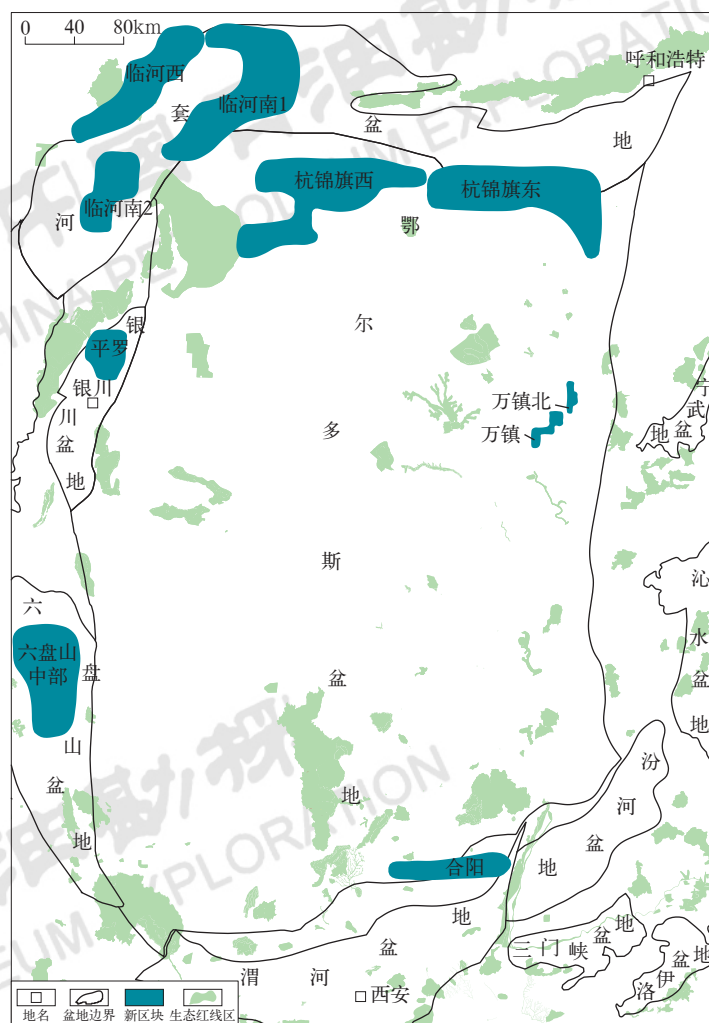


图9 鄂尔多斯盆地及外围盆地新提出区块分布图

Fig.9 Current status of newly proposed blocks in Ordos Basin and its surrounding basins

表 1 鄂尔多斯盆地及外围盆地新提出油气矿权区块情况表
Table 1 Newly proposed oil and gas mining rights blocks in Ordos Basin and its surrounding basins

区块	盆地	构造位置	勘探层系	领域	地表条件	综合排序
临河南 1	河套盆地	临河凹陷东南断阶带	K、E	常规油	平原，人口密集，黄河河道	1
临河南 2	河套盆地	临河凹陷东南断阶带	K、E	常规油	沙漠，缺水源	2
万镇	鄂尔多斯盆地	晋西挠褶带	C—P	致密气、深层煤层气	黄土高原，黄河谷地，有一定环保风险	3
万镇北	鄂尔多斯盆地	晋西挠褶带	C—P	致密气、深层煤层气	黄土高原，黄河谷地，有一定环保风险	4
临河西	河套盆地	临河凹陷西部陡坡带	K、E	常规油	平原，人口密集，黄河河道	5
六盘山中部	六盘山盆地	固原凹陷、海原凹陷	T、J、K	常规油	黄土塬、山地	6
平罗	银川盆地	平罗凹陷	E	常规油	平原，农垦区，人口密集	7
杭锦旗东	鄂尔多斯盆地	伊盟隆起东段	C—P	煤层气、煤化工	沙地，交通便利，缺水源	8
杭锦旗西	鄂尔多斯盆地	伊盟隆起西段	C—P	煤层气、煤化工	沙地，交通便利，缺水源	9
合阳	鄂尔多斯盆地	渭北隆起	C—P	煤层气	黄土塬，有地方煤矿	10

4 建议

鄂尔多斯盆地及外围空白区面积大，涉及复杂多样的勘探领域，有充足的矿权拓展空间，建议由国家积极倡导，公益性调查单位与油公司积极参与，在本文建议的新矿权内开展战略性、基础性调查工作，加大实物工作量投入，对其中一些重点的地区部署地震、钻井等侦察性工作，集中力量攻关风险目标，争取在短期内获得突破，待矿权出让后，进一步吸引油公司进行系统性勘探，助力区内多类型油气资源的勘探开发与地方经济建设。针对新矿权各自的地质特点与勘探现状，有如下建议：

(1) 鄂尔多斯盆地北缘杭锦旗东、杭锦旗西区块面积大，准格尔煤矿、东胜煤矿等分布其中，如何排除无效面积、缩聚有利区范围是关键。建议由国家主导，将北缘空白区规划成大型煤系资源勘查区或煤化工示范基地，部署二维测线和钻井，落实煤层分布，获取煤层气评价与有利区块优选的关键参数。盆地南缘合阳区块也应开展相似的、新的地震与钻井勘查工作。

(2) 鄂尔多斯盆地东缘万镇地区，构造稳定，保存条件好，周边已发现连片分布的致密气储量，是东缘最有利的区块，但是黄河河道穿过区块，黄河两岸有可能划成保护区。建议深入调研当地环保政策，详

细调查区内环保区分布及施工条件，评价生态环保风险升级的可能性，为区块出让提供准确的评价数据。

(3) 河套盆地临河凹陷已经发现了大量油气，临近空白区的探井产量很高，但空白区的物探、钻探资料时代老、品质较差。建议加强地震资料的重新处理与解释，或者有针对性地部署一些加密地震测线，进一步落实区内圈闭分布、形态、幅度等，同时加强与邻区（矿权区）油气成藏条件类比，不断夯实临河凹陷 3 个新区块的评价依据。

(4) 银川盆地、六盘山盆地空白区面积大，盆地基底结构与物质组成尚不清楚，六盘山盆地深部的三叠系、侏罗系是否具有成藏条件主要依据少量的物探、化探资料进行推测。建议在原有资料基础上，加强基础研究、露头地质调查，以及盆地原型发育与演化改造的分析，并有针对性地部署一批高精度的地震测线或时频电磁，落实地层分布，探索深部油气系统的成藏条件。

(5) 鄂尔多斯盆地西缘空白区面积较少，地质结构复杂，保存条件是关键。建议一方面攻关黄土塬、复杂构造区地震采集、处理、解释一体化技术，提高地震资料质量与解释精度，进一步落实构造稳定区与有利保存区；另一方面要重点研究成藏主控因素，搞清构造演化对动态成藏的控制作用，不断构建西缘地区油气成藏新模式，打破西缘地区“多点开花，

有藏无田”的尴尬局面。

(6) 鄂尔多斯盆地周缘空白区地形地貌十分复杂, 陕北黄土塬千沟万壑、六盘山地区山高谷深、毛乌素沙漠、库布齐沙漠绵延数百千米, 这些地区生态环境比较脆弱。同时因为煤层大片分布, 在鄂尔多斯盆地边缘建有大量零碎的煤工业基地, 外围盆地中的河套、银川、关中是重要的工农业基地与居民地, 基于以上原因, 优选新矿权必须考虑当地的生态承受能力、城建规划、企地矛盾、用地需求, 以及煤矿重叠等情况, 建议国家相关部门系统排查区内生态红线区、煤矿分布等影响矿权登记的关键因素, 建立生态红线库并及时备案, 作为储备出让区块库的重要补充, 为以后国家油气矿业权净矿出让和竞争性出让提供完备、可靠的数据基础。

参考文献

- [1] 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5):1013–1023.
Guo Xusheng, Zhou Dehua, Zhao Peirong, *et al.* Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous–Permian coal measure strata, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5):1013–1023.
- [2] 杨虎林, 姜文利, 李登华, 等. “十三五”全国油气资源评价项目成果报告[R]. 北京: 自然资源部油气资源战略研究中心, 2020:235–246.
Yang Hulin, Jiang Wenli, Li Denghua, *et al.* “13th Five Year Plan” national oil and gas resources assessment project achievement report[R]. Beijing: Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, 2020:235–246.
- [3] 郝志伟, 王金铎, 崔红庄, 等. 银川盆地古近系清水营组生烃潜力分析[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(5):31–33.
Hao Zhiwei, Wang Jinduo, Cui Hongzhuang, *et al.* Hydrocarbon generation capacity analysis of Paleogene Qingshuiying Formation Yinchuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(5):31–33.
- [4] 高胜利. 河套盆地浅层气(生物气)成藏地质条件研究[D]. 西安: 西北大学, 2007:8–25.
Gao Shengli. Research about geological conditions of shallow gas(biogenic gas) accumulation in Hetao Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2007:8–25.
- [5] 关宝文, 郑建京, 许世阳, 等. 六盘山盆地油气成藏主控因素分析[J]. 特种油气藏, 2015, 22(1):16–21.
Guan Baowen, Zheng Jianjing, Xu Shiyang, *et al.* Analysis of main factors of hydrocarbon accumulation in Liupanshan Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(1):16–21.
- [6] 王兴. 渭河盆地地热资源赋存与开发[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2005:29–39.
Wang Xing. Occurrence and development of geothermal resources in Weihe Basin[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technique Publishing House, 2005:29–39.
- [7] 国土资源部油气资源战略研究中心. 全国油气资源动态评价(2015)[M]. 北京: 中国大地出版社, 2017:94–102.
- [8] 邓昆, 白斌, 周文, 等. 鄂尔多斯盆地平凉期沉积构造演化及页岩气勘探潜力[M]. 北京: 科学出版社, 2016:88–89.
Deng Kun, Bai Bin, Zhou Wen, *et al.* Evolution of sedimentary structures and potential for shale gas exploration during the Pingliang period in the Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press, 2016:88–89.
- [9] 白云来, 王新民, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地西缘构造演化及与相邻盆地关系[M]. 北京: 地质出版社, 2010:66–98.
Bai Yunlai, Wang Xinmin, Liu Huaqing, *et al.* Tectonic evolution of the western margin of the Ordos Basin and its relationship with adjacent basins[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:66–98.
- [10] 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 Jinhua, Fan Liyong, Liu Xinshe, *et al.* New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4):418–430.
- [11] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3):30–41.
Yang Xiuchun, Xu Fengyin, Wang Hongya, *et al.* Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3):30–41.
- [12] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12):1–16.
Xu Fengyin, Yan Xia, Li Shuguang, *et al.* Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12):1–16.
- [13] 钟建华, 刘闯, 吴建光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气共生藏特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6):1517–1525.
Zhong Jianhua, Liu Chuang, Wu Jianguang, *et al.* Symbiotic accumulation characteristics of coal measure gas in Linxing block, eastern Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6):1517–1525.
- [14] 米立军, 朱光辉. 鄂尔多斯盆地东北缘临兴—神府致密气田成藏地质特征及勘探突破[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3):53–67.
Mi Lijun, Zhu Guanghui. Geological characteristics and exploration breakthrough in Linxing–Shenfu tight gas field, northeastern Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3):53–67.
- [15] 付金华, 于洲, 李程善, 等. 鄂尔多斯盆地东部米探1井奥陶系马四段天然气勘探新发现及勘探方向[J]. 天然气工业, 2021, 41(12):17–27.
Fu Jinhua, Yu Zhou, Li Chengshan, *et al.* New discovery and favorable areas of natural gas exploration in the 4th member of Ordovician Majiagou Formation by Well Mitan 1 in the eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(12):17–27.
- [16] 伊伟, 熊先钺, 王伟, 等. 鄂尔多斯盆地合阳地区煤层气赋存特征研究[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(2):38–45.
Yi Wei, Xiong Xianyue, Wang Wei, *et al.* Study on occurrence features of coalbed methane in Heyang area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(2):38–45.

- [17] 王小洪, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 鄂尔多斯韩城地区石炭—二叠系含煤沉积体系及其控气作用[J]. 石油实验地质, 2013, 35(6): 646–650.
Wang Xiaohong, Liu Dameng, Yao Yanbin, *et al.* Carboniferous–Permian coal-bearing depositional system and its controlling role of coalbed methane in Hancheng area in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 646–650.
- [18] 邹才能, 陈艳鹏, 孔令峰, 等. 煤炭地下气化及对中国天然气发展的战略意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 195–204.
Zou Caineng, Chen Yanpeng, Kong Lingfeng, *et al.* Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 195–204.
- [19] 席胜利, 魏嘉怡, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地海相页岩油勘探发现及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 253–269.
Xi Shengli, Wei Jiayi, Zhang Caili, *et al.* Discovery and significance of marine shale oil exploration in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 253–269.
- [20] 安少乐, 王鑫鑫, 李光祥, 等. 六盘山盆地西南缘重力场与深部构造特征研究[J]. 石油化工应用, 2014, 33(11): 75–79.
An Shaole, Wang Xinxin, Li Guangxiang, *et al.* Structure characteristics of the gravity field and deep research of southwest Liupanshan Basin[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(11): 75–79.
- [21] 杨福忠, 胡社荣. 六盘山盆地中、新生代构造演化和油气勘探[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(3): 192–195.
Yang Fuzhong, Hu Sherong. Tectonic evolution and oil–gas exploration during the Mesozoic and Cenozoic in Liupanshan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(3): 192–195.
- [22] 谢青, 杨兴科, 江宽. 六盘山盆地西南缘构造特征及盆地油气有利区预测[J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(4): 560–566.
Xie Qing, Yang Xingke, Jiang Kuan. Structural characteristics of southwestern margin of the Liupanshan Basin and the potential oil and gas area prediction[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2015, 30(4): 560–566.
- [23] 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恢复及其改造演化[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.
- [24] 张锐锋, 于福生, 刘喜恒, 等. 河套盆地临河坳陷及其周边地区中—新生生成盆演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1139–1150.
Zhang Ruifeng, Yu Fusheng, Liu Xiheng, *et al.* Evolutionary characteristics of Linhe Depression and its surrounding areas in Hetao Basin from the Mesozoic to Cenozoic[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1139–1150.
- [25] 张以明, 张锐锋, 王少春, 等. 河套盆地临河坳陷油气勘探重要发现的实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(5): 1–11.
Zhang Yiming, Zhang Ruifeng, Wang Shaochun, *et al.* Practice and understanding of great discovery in oil and gas exploration in Linhe Depression of Hetao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(5): 1–11.
- [26] 沈华, 刘震, 史原鹏, 等. 河套盆地临河坳陷油气成藏过程解剖及勘探潜力分析[J]. 现代地质, 2021, 35(3): 871–882.
Shen Hua, Liu Zhen, Shi Yuanpeng, *et al.* Hydrocarbon accumulation process and exploration potential in Linhe Depression, Hetao Basin[J]. Geoscience, 2021, 35(3): 871–882.
- [27] 王权, 刘震, 李晨曦, 等. 河套盆地临河坳陷中—新生代烃源岩分布地震预测[J]. 现代地质, 2021, 35(3): 850–860.
Wang Quan, Liu Zhen, Li Chenxi, *et al.* Seismic prediction for Mesozoic–Cenozoic source rock distribution in the Linhe Depression, Hetao Basin[J]. Geoscience, 2021, 35(3): 850–860.
- [28] 杨华, 李民才, 崔永平. 河套盆地生物气成藏条件及勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(3): 16–21, 69.
Yang Hua, Li Mincai, Cui Yongping. Accumulation condition and exploration prospects of biogenic gas in Hetao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(3): 16–21, 69.
- [29] 左智峰, 赵俊兴, 陈洪德, 等. 河套盆地呼和坳陷浅层生物气气源条件分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(3): 41–44.
Zuo Zhifeng, Zhao Junxing, Chen Hongde, *et al.* An analysis on source conditions of shallow biogas reservoirs in Huhe Depression, Hetao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(3): 41–44.
- [30] 徐清海, 吴楠, 王健, 等. 银川盆地清水营组咸化湖盆沉积特征与湖盆演化[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 317–328.
Xu Qinghai, Wu Nan, Wang Jian, *et al.* Sedimentary characteristics and lake basin evolution of salinized lake basin of Qingshuiying Formation in Yinchuan Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 317–328.
- [31] 李玉宏, 王行运, 韩伟, 等. 渭河盆地固市凹陷渭热2井组甲烷气成因及其意义[J]. 地质通报, 2013, 32(11): 1790–1797.
Li Yuhong, Wang Xingyun, Han Wei, *et al.* Genesis and significance of methane in Weire 2 well of Gushi Depression in Weihe Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(11): 1790–1797.
- [32] 张梦婷, 李文厚, 李玉宏, 等. 渭河盆地及周缘上古生界残留地层分布及油气意义[J]. 地质科学, 2019, 54(2): 423–433.
Zhang Mengting, Li Wenhui, Li Yuhong, *et al.* Residual stratigraphic distribution and hydrocarbon significance of Upper Paleozoic in Weihe Basin and its adjacent area[J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(2): 423–433.