

文章编号: 1001-1986(2019)01-0015-07

黄陵地区中生代含煤岩系油气与铀成矿的耦合关系

司庆红¹, 曹惠锋², 李建国¹, 司马献章¹, 俞初安¹, 刘厚宁², 刘晓雪¹, 张超¹

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 为了明确黄陵地区中生代含煤岩系油气与铀成矿的耦合关系, 进行了钻孔与剖面的野外地质调查、钻孔资料与实验数据的分析与处理、油气藏与铀矿(点)信息的综合整理, 系统研究了中生代含煤岩系构造-沉积体系、铀矿地质特征和油气地质特征, 从油气藏与铀矿(点)的空间分布关系、含烃流体与铀的伴生蚀变矿物的成因关系以及烃源岩生烃与铀成矿的时间关系展开讨论。研究表明: 中生代含煤岩系铀矿(点)多分布在基岩剥蚀边界或小型断裂附近, 且水平投影位于油气有利相带周缘; 烃类流体组分及煤层气的中间产物可能参与氧化还原反应, 生成黄铁矿、方解石等与铀矿物具有密切伴生关系的矿物; 中生代含煤岩系烃源岩主生烃期和排烃期总体早于铀矿主成矿期, 烃类流体可能通过运移影响铀成矿作用。

关键词: 黄陵地区; 中生代; 含煤岩系; 油气(藏); 铀矿(点); 烃类流体; 铀伴生蚀变矿物

中图分类号: P619.14 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.01.003

Coupling relationship between oil and gas of Mesozoic coal-bearing measures and uranium metallogenesis in Huangling area

SI Qinghong¹, CAO Huifeng², LI Jianguo¹, SIMA Xianzhang¹, YU Reng'an¹,
LIU Houning², LIU Xiaoxue¹, ZHANG Chao¹

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Geological Survey Institute of China Nuclear Industry Group Co. Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to clarify the coupling relationship between oil and gas of Mesozoic coal-bearing measures(reservoir) and uranium deposits(points) in Huangling area, field geology investigations of boreholes and sections, analysis and processing of borehole data and experimental data, and integration of reservoir and uranium(point) information were carried out. Collation and systematic study of tectonic-sedimentary systems of Mesozoic coal-bearing measure, uranium geological characteristics, oil and gas geology characteristics, spatial distribution relationship between hydrocarbon reservoirs and uranium deposits, genetic relationship between hydrocarbon-bearing fluids and uranium-associated altered minerals, and the time relationship between hydrocarbons and uranium mineralization were discussed. The study shows that the uranium deposits of Mesozoic coal-bearing(spots) measures were mostly distributed near the boundary of the bedrock erosion or small faults, and the horizontal projection is located at the periphery of the favorable oil and gas facies belt. The hydrocarbon fluid components and the intermediate products of the coalbed gas may have participated in the re-dox reactions, then the uranium associated altered minerals such as pyrite, clay minerals, and calcite have been produced. The main hydrocarbon generation period of Mesozoic coal-bearing source rocks was overall earlier than the main mineralization period of uranium deposits, and hydrocarbon fluids may have migration time conditions that affected uranium mineralization.

Keywords: Huangling area; Mesozoic; coal-bearing measures; oil-gas reservoir; uranium deposits(points); hydrocarbon-bearing fluids; uranium-associated altered minerals

收稿日期: 2018-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604200); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB453000); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160127)

Foundation item: National Key R&D Program of China(2018YFC0604200); National Basic Research Program of China(973 Program)(2015CB453000); Geological Survey Project of China Geological Survey(DD20160127)

第一作者简介: 司庆红, 1986 年生, 男, 河北石家庄人, 硕士, 工程师, 从事油气、铀矿资源的调查与研究. E-mail: zgky_sqh@163.com

通信作者: 李建国, 1980 年生, 男, 福建松溪人, 博士, 教授级高级工程师, 从事砂岩型铀矿调查与研究. E-mail: jianguo_lee@126.com

引用格式: 司庆红, 曹惠锋, 李建国, 等. 黄陵地区中生代含煤岩系油气与铀成矿的耦合关系[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 15-21.

SI Qinghong, CAO Huifeng, LI Jianguo, et al. Coupling relationship between oil and gas of Mesozoic coal-bearing measures and uranium metallogenesis in Huangling area[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1): 15-21.

鄂尔多斯盆地是我国重要的能源基地,其中中生代含煤岩系具有得天独厚的石油、天然气、煤炭以及铀矿资源赋存条件。目前,铀矿资源在我国能源结构中所占地位日益突显,是重要的国防战略资源和核电清洁能源。黄陵地区中生代主要铀矿层位为中侏罗统直罗组,铀的伴生矿物主要有黄铁矿、方解石、石膏等,含矿层段及围岩可见油气蚀变显示^[1-2]。前人证实研究区直罗组油气源自延长组烃源岩,并认为铀成矿可能会受到油气运移的重要影响^[3-6]。但是对油气(藏)与铀矿的空间关系、烃类组分与铀矿物的成因关系以及生烃与铀成矿的时间关系的研究程度较低,因而中生代油气与铀成矿的耦合关系的

认识不足,制约了油气对铀成矿的影响规律认识。本次研究在分析黄陵地区中生代含煤岩系构造-沉积体系、铀矿地质特征和油气地质特征的基础上,围绕油气(藏)与铀矿的空间关系、烃类组分与铀矿物的成因关系以及生烃与铀成矿的时间关系 3 个问题展开讨论。

1 黄陵地区中生代含煤岩系构造-沉积体系

研究区位于鄂尔多斯盆地东南部,地处伊陕斜坡带南翼边部,东与鄂尔多斯侏罗纪残留盆地边界相接,南与渭北断裂及渭北隆起次级构造单元庙彬褶皱带毗邻(图 1)。

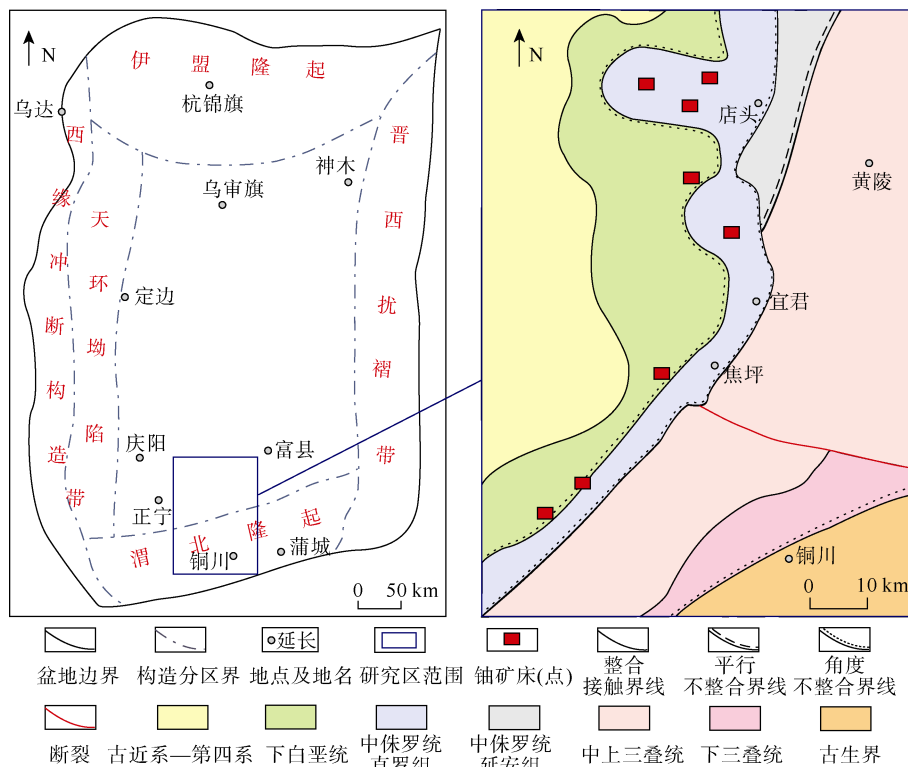


图 1 黄陵地区构造位置略图^[1-2,6]

Fig.1 Tectonic location of Huangling area^[1-2,6]

鄂尔多斯盆地南缘直罗组在中侏罗世晚期被大面积剥蚀,该地质时期构造格局表现为由南西向北东倾斜。晚侏罗世后,受燕山运动的微弱影响,该区东部地层抬升,地层由南东向北西倾斜^[7]。

通过钻孔与剖面对比,认为黄陵地区油气与铀成矿作用相关的中生代含煤岩系主要为上三叠统延长组和中侏罗统延安组、直罗组。

上三叠统延长组(T_3y)以顶部区域抬升剥蚀形成的构造不整合面和其底部以不整合与下伏中三叠统的接触面为界,延长组各构造层构造展布特征具有很好的继承性。延长组油气圈闭具有明显的相控和源控特征^[8]。

中侏罗统延安组(J_2y)岩性以灰色泥岩、粉砂岩为主,发育煤层,砂岩中含大量的炭屑,局部岩性段煤线中见铀矿化^[9]。延安组假整合于三叠系之上,为一套河沼相含煤碎屑岩建造,含煤系数为 2%~3.13%,煤层总厚 2.6~2.8 m^[10]。

中侏罗统直罗组(J_2z)研究区直罗组为一套杂色河流-湖泊沉积,沉积相主要为泛滥平原相和河道相^[6](图 2)。直罗组下段含矿目的层辫状河-曲流河砂体发育,主要由不同粒度的砂岩及少量的砾岩、粉砂岩构成,砂体平面形态上呈面状、似层状,厚度比较稳定,发育大型槽状交错层理,具有泛联通特征,垂向上具有下粗上细的正粒序结构,砂体总

体西南厚东北薄, 埋深东部浅西部深。直罗组上段以杂色沉积为主, 为干旱湖泊及曲流河沉积体系。

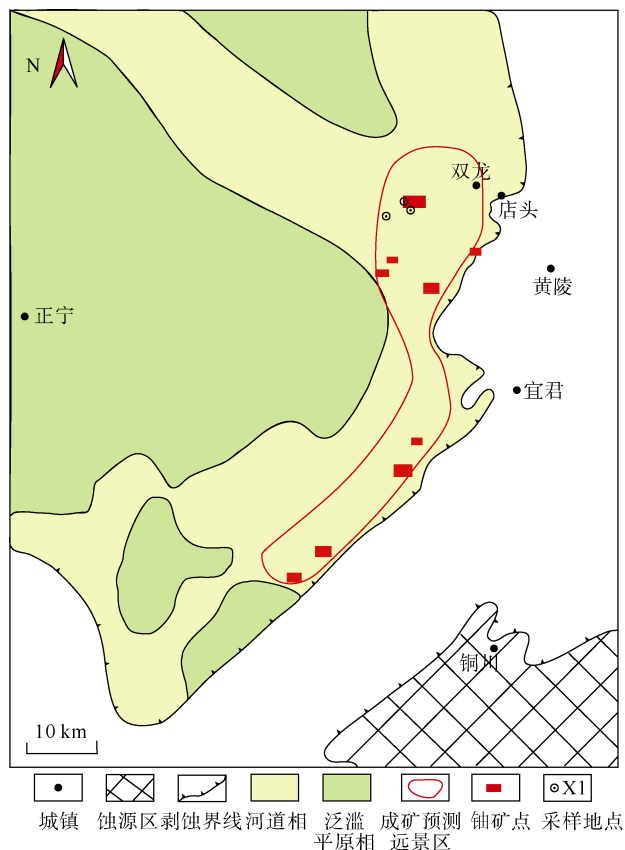


图 2 黄陵地区直罗组沉积相分布图^[6]

Fig.2 Sedimentary facies of Zhiluo Formation in Huangling area^[6]

2 中生代含煤岩系铀矿地质特征

2.1 铀矿(点)空间分布特征

黄陵地区中生代含煤岩系铀矿(点)主要分布于渭北隆起北缘构造斜坡带(图 1), 铀矿(点)主要目标层为直罗组下段, 其次为延安组。

直罗组下段含矿段为一套灰色中粗粒砂岩, 泥质胶结, 透水性一般。其顶板为直罗组上段(J_{2z_2})紫红色泥岩, 富含顺层、穿层石膏脉, 底板为延安组(J_{2y})灰黑色泥岩, 见有大量石膏脉。上下 2 层泥岩形成了良好的隔水层, 使其具备完整的“泥-砂-泥”结构。

黄陵地区直罗组下段砂体埋深受地形影响较大, 但是总体埋藏适中, 具东浅西深埋藏型层状结构。一般埋深在 200~500 m, 东边埋深最浅处 100 m 左右, 西北部埋深最深可达 650 m。

直罗组下段含矿砂体主要为河道相(图 2), 形态呈面状, 层状、似层状, 在区内分布较稳定, 砂体厚度一般 20~85 m, 平均厚度约 60 m, 总体呈现西北厚东南薄。

2.2 铀矿物及伴生蚀变矿物

直罗组下段下亚段含矿岩性为灰色中粗砂岩, 砂岩含大量炭质碎屑和黄铁矿结核, 炭质碎屑主要是沿疏松砂岩层面分布。本次研究重点选取含矿孔 X1、X2、X3(图 2)进行野外调查和样品采集。调查中见到在直罗组下段含矿砂体及围岩中观察到炭质、碳酸盐岩化、硫酸盐化、黏土矿化、金属化合物等蚀变现象。另外在 X2 井含矿砂体中上部见到明显的油斑和油浸(图 3)。

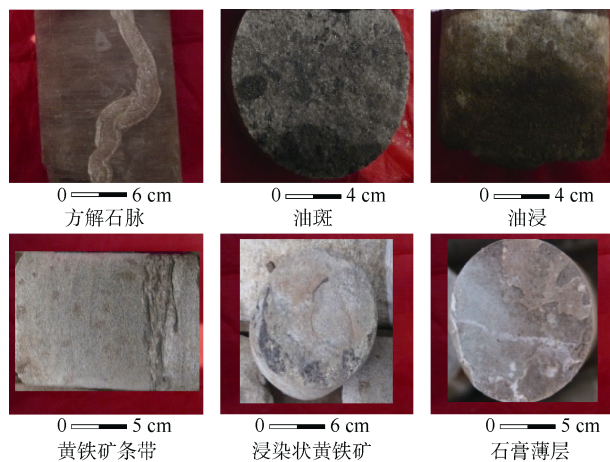


图 3 直罗组下段铀矿层及围岩的砂岩岩心蚀变照片

Fig.3 Photographs of sandstone core alteration in uranium deposit and surrounding rock of the lower section of Zhiluo Formation

采集含矿孔 X1、X2、X3 的矿段岩心样品进行铀矿物鉴定分析。背散射图(图 4)显示直罗组铀矿物主要包括铀石、沥青铀矿、钛铀矿等晶质铀矿, 呈浸染状、团块状、星散状赋存于粒间和胶结物中。此外, 通过背散射图可看到炭质、黄铁矿、黏土矿物、金属化合物等与铀矿物共生现象。

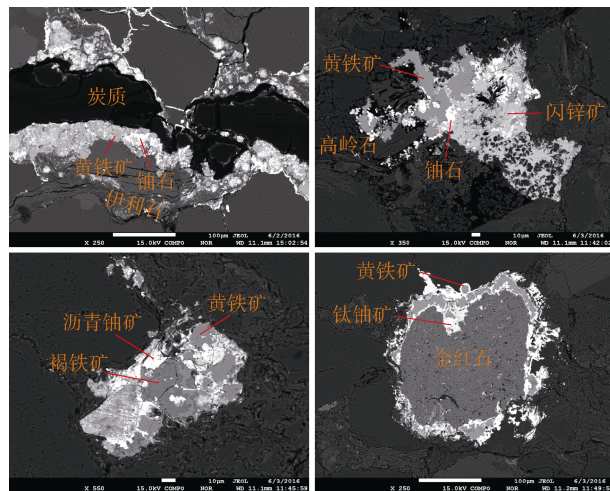


图 4 铀矿物及伴生蚀变矿物背散射图

Fig.4 Back scattering of uranium minerals and associated altered minerals

2.3 铀成矿年代

为增加铀成矿年龄的可信度,本次研究采取实验测试与前人资料相结合的方法综合确定研究区铀成矿年龄。分别采集 X1、X2、X3 孔的高品位含矿砂岩样品 N1、N2、N3(表 1),利用仪器型号为 ISOPROBE-T 热表面电离质谱仪测定铀铅等时年龄,检测方法依据 EJ/T 693—2007《沥青铀矿、晶质铀矿的年龄测定方法》。实验数据拟合度较高,计算出铀成矿年龄约为(52.6±2.2) Ma(图 5)。

表 1 直罗组矿段砂岩铀矿物测年实验数据
Table 1 Uranium dating data of uranium minerals in sandstone of Zhiluo Formation

样号	岩性	品位/%	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	标准差
N1	灰色粗砂岩	0.058 2	445	28.08	0.006
N2	深灰色中砂岩	0.107 0	1 624	38.11	0.002
N3	灰色粗砂岩	0.038 6	5 203	66.13	0.004

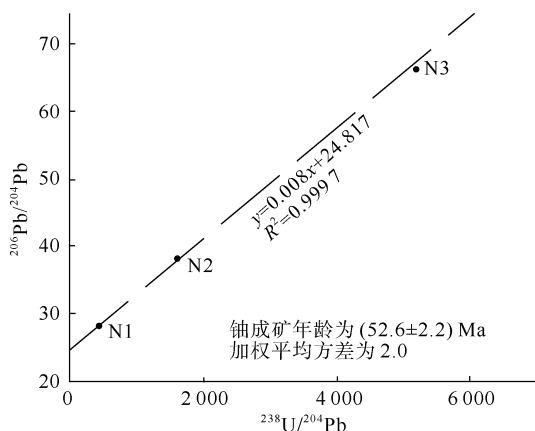


图 5 黄陵地区铀矿物 U-Pb 同位素年龄测定拟合曲线图

Fig.5 Fitting curve of U-Pb isotopic dating of uranium minerals in Huangling area

前人在研究区店头和双龙地区开展过铀测年工作^[1,4-6,11-12],通过矿石铀矿物同位素年龄测定分别为 110 Ma~98 Ma、141.8 Ma、125.2 Ma,成矿时代属早白垩世沉积成岩期;利用全岩 U-Pb 同位素等时线方法测得铀矿床成矿年龄为(51.0±5.8) Ma 和(41.8±9.3) Ma。结合本次测年结果,研究区铀成矿年龄总体分为(125.2~98.0) Ma 和(52.6±2.2) Ma~(41.8±9.3) Ma 2 个成矿期次。

前人通过研究将鄂尔多斯东南部地区直罗组铀成矿阶段划分为 3 个阶段^[5-6,11-12],包括沉积过程的预富集阶段、中侏罗世晚期—晚侏罗世的自身还原沉淀的初次富集阶段和晚白垩世之后受外部还原流体发生的成矿改造阶段,其中成矿期次主要为初次富集作用和成矿改造作用。据此推测,将早白垩世沉积成岩期(125.2 Ma~98 Ma)划分为初次富集阶

段,将晚白垩世之后(52.6±2.2) Ma~(41.8±9.3) Ma 划分为成矿改造阶段。

根据铀矿物赋存状态与分布特征(图 3 和图 4),推测炭质可能为初次富集阶段提供还原剂,黄铁矿、后生方解石等蚀变矿物的产出可能是受到外部还原流体作用的产物。

3 中生代含煤岩系油气地质特征

3.1 中生代油气空间分布特征

通过钻孔编录与野外油气识别,在研究区钻孔中发现直罗组下段中粒砂岩及围岩中见到星点状链条状的油斑、油迹或油浸现象(图 3)。

黄陵地区延长组各油层组均发育,其中主力烃源岩为长 4+5—长 9 烃源岩湖相灰黑色泥岩和泥沼相含煤建造和灰色泥岩,长 7 烃源岩生烃潜力最高,其次为长 8—长 9 烃源岩,长 4+5 和长 6 烃源岩相对较差^[13-14]。

前人认识到鄂尔多斯南部延长组油气藏具有典型“源控”和“相控”的分布特征并主要聚集在近油源的三角洲前缘砂体中^[15-17]。通过延长组长 4+5 油层组—长 9 油层组沉积相^[17]分布特征(图 6)可看出,黄陵地区延长组具有有利的油气成藏条件,有利区带(三角洲前缘分布区)主要聚集在黄陵县周缘,总体上呈北东—南西向展布。

此外,田文广等^[18]研究发现,黄陵地区延安组煤层具有一定的煤层气资源潜力,煤层埋深小于 700 m 的彬县、焦坪和黄陵地区煤层气含气量较高,局部煤层含气量可达 5~7 m³/t^[18]。

3.2 中生代油气烃类流体成分

采集直罗组油浸砂岩样品,并与前人的延长组和延安组烃源岩测试结果^[10,13]进行族组分对比(表 2)。

根据表 2 分析可知:相对延安组煤系烃源岩和直罗组自身泥岩而言,直罗组砂岩中油组分与延长组烃源岩具有更相似的烃类组成。这一认识与前人延长组烃源岩为中生代含煤岩系主要油气来源的判断一致。

鄂尔多斯南部地区延长组的长 4+5、长 6、长 7、长 8 和长 9 油层组烃源岩均已达到一定生烃转化率和生烃量^[14,19](表 3)。

李洪英等^[20-21]研究发现,鄂尔多斯东南部地区侏罗系石油沥青中缺少沉积岩中的优势富集元素而铁族元素、亲硫元素、碱金属元素相对富集。由于延长组油气流通常具有强还原性,油气流中富集元素也处于还原价态。

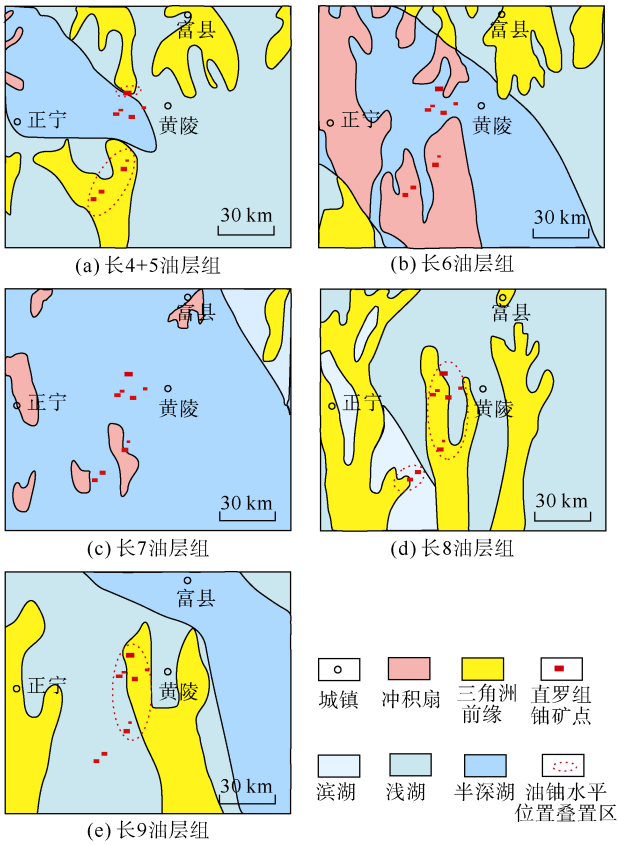


图 6 黄陵及周缘地区延长组沉积相与直罗组铀矿点分布关系图^[6,17]

Fig.6 Relationship between the sedimentary facies of Yanchang Formation and the distribution of uranium deposits in Zhiluo Formation in Huangling and peripheral areas^[6,17]

黄陵地区延安组煤层气为生物成因气，生物甲烷形成于二氧化碳还原途径，且存在晚期生物气的补充^[18,22-23]。延安组低阶段煤的煤层气生烃过程伴生还原组分和二氧化碳，二氧化碳还原型生物成因气产生过程中产甲酸、乙酸、丙酸、丁酸、甲醇、乙醇、氢气和二氧化碳等中间产物^[22-24]，其中丙酸、丁酸和乙醇为还原态有机化合物。

3.3 中生代烃源岩成烃年代

由于长 4+5 油层组—长 9 油层组为黄陵地区中生代地层主力烃源岩，其烃源岩的成烃期即为中生代含煤岩系的主生烃期。根据黄陵地区中生代含煤岩系埋藏—热史^[25]分析主生力烃源岩热成烃过程(图 7)。

长 4+5 油层组—长 9 油层组烃源岩热成烃有如下规律：早白垩世早期(约 135 Ma)，长 4+5 油层组—长 9 油层组烃源岩埋深逐渐增大而持续升温；在早白垩世中期(约 118 Ma)，部分烃源岩达到生油门限，开始生油；至晚白垩世早期(约 95 Ma)，烃源岩逐渐达到生油高峰，并且部分烃源岩热演化程度已达到生气窗口，该阶段可能伴有气体生成。此后，地层受构造活动的影响被抬升，烃源岩开始冷却降温，生烃作用结束。从主力烃源岩热演化过程看，中生代含煤岩系的主生烃期为早白垩世中期至晚白垩世早期(118 Ma~95 Ma)。

延安组煤层为中生代地层的次要烃源岩，在早侏罗世开始成气，并在后期得到补充^[17]。

表 2 不同岩系氯仿沥青“A”族组分质量分数

Table 2 Percentage relative content of “A” group components of chloro-form asphalt of different rock series

层位	岩性	饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%
直罗组	含油砂岩	59.2	22.7	7.5	4.2
	泥岩	2.8~10.2/6.0	0~13.7/7.6	7.1~15.7/12.6	37.0~70.9/57.7
延安组 ^[10]	泥岩	10.5	21.2	45.5	22.8
延长组 ^[13]	长4+5泥岩	10.5~49.8/29.4	11.8~13.4/12.6	18.9~60.0/40.0	9.1~10.5/9.7
	长6泥岩	6.1~52.0/32.1	7.7~15.9/12.5	18.8~72.0/41.1	3.3~10.3/8.4
	长7泥岩	25.6~51.9/40.0	10.9~16.2/13.4	19~48.3/31.8	8.1~10.3/9.1

注：2.8~10.2/6.0 表示最小值~最大值/平均值，文中其他数据同。

表 3 鄂尔多斯盆地南部延长组烃源岩有机地球化学指标^[14]

Table 3 Organic geochemical indexes of source rocks of Yanchang Formation in the southern Ordos basin^[14]

层位	镜质体反射率 $R_{\text{ran}}/\%$	有机质类型	有机碳/%	总烃/(mg·kg ⁻¹)	氯仿沥青“A”/%
长4+5	0.53~0.88/0.65	II ₂ -III	0.20~6.30/1.08	4.80~4 148.9.0/1 111.40	0.02~0.73/0.23
长6	0.56~0.89/0.71	II ₂ -III	0.35~10.27/1.71	24.00~598.80/211.30	0.04~0.11/0.08
长7	0.60~0.93/0.72	I-II ₁	0.45~13.38/3.24	65.30~4 915.50/2 463.50	0.04~1.03/0.58
长8	0.79~1.02/0.86	II ₂ -III	0.28~8.55/2.01	35.40~3 831.60/1 068.90	0.03~0.50/0.21
长9	0.76~0.93/0.85	II ₁	1.08~3.56/1.85	105.00~25 579.00/887.50	0.07~0.47/0.21

4 讨论

4.1 油气与铀矿的空间分布关系

黄陵地区以中生代含煤岩系为目标层的铀矿(点)多分布在基岩剥蚀边界或小型断裂附近(图 1)。

此外，从油铀水平位置叠置区(图 6 中红色虚线圈)可看出直罗组铀矿(点)分布在延长组油气有利区带附近。

断裂的作用一方面表现为局部排泄区，是构成地下水补—径—排体系的重要组成部分；另一方面基岩剥

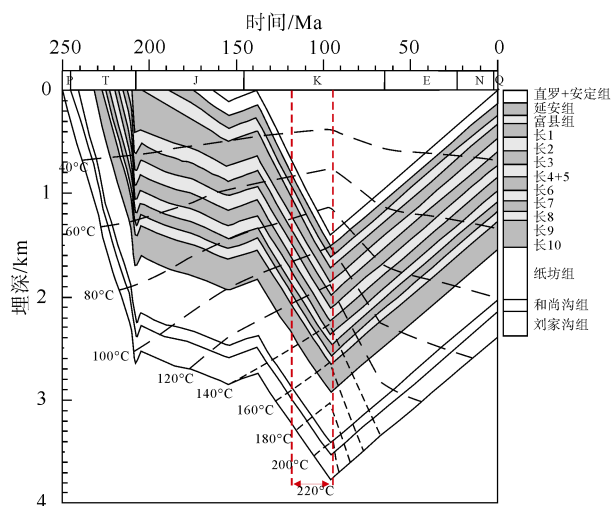


图 7 黄陵地区中生代含煤岩系埋藏史-热史图^[25]

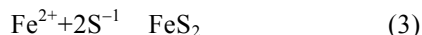
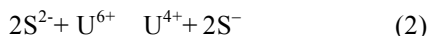
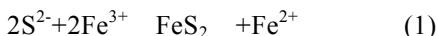
Fig.7 Burial and thermal history of Mesozoic coal-bearing measures in Huangling area^[25]

蚀边界或小型断裂改变了地层中油气流体压力, 断裂构造可能沟通了深部油气^[26], 油气流体可能从延长组长 4—长 9 油层组或延安组煤层向上部地层运移。当断裂沟通深部储油构造时, 强还原气体(H_2 , CH_4 , CO , H_2S 等)易于逸出并沿断裂向上迁移, 在其与含氧含铀地下水相遇时, 将高价铀离子还原沉淀^[26]。

4.2 含烃流体成分与铀伴生矿物的关系

黄铁矿、后生期方解石等铀的伴生蚀变矿物与延长组油气组分和延安组生物气中间产物组分具有密切成因联系。

在地层油气流温度和弱还原条件下, 黄铁矿易于生成。当延长组油气流运移至直罗组或延安组时, 流体中低价硫可与三价铁和六价铀等发生反应, 生成一价硫、亚铁离子及四价铀, 形成铀矿物和黄铁矿。黄铁矿形成化学方程式如式(1)和式(2), 铀矿物形成化学方程式如式(3)。



延安组煤层气在运移至延安组上部或直罗组下段后, 具有还原态的中间产物与地层中六价铀发生还原反应, 同时煤层气中二氧化碳可为方解石的形成提供碳源。方解石形成过程如式(4)。



相比后生方解石, 黄铁矿与铀矿物关系更为密切。延长组油气流中铁族元素、亲硫元素、碱金属元素相对富集, 更易于生成黄铁矿等蚀变矿物; 而延安组生物成因煤层气具有还原价态的中间产物多为酸类和醇类和二氧化碳, 后生方解石的生成可能更能反映生物气作用。综合铀矿(点)的蚀变现象和油气有机地球化学特征, 认为延长组油气作用对铀

成矿可能起到主要作用。

4.3 油气生成与铀富集的时间关系

在晚白垩世, 随着延长组烃源岩热演化程度不断升高, 生烃量逐渐增加, 生烃增压作用持续增强, 古近纪以来鄂尔多斯南部强烈差异性断块升降运动^[2]可能引发研究区延长组油气发生大规模排烃作用运移至上覆地层。延安组煤层气由于在早侏罗世之后不断获得生物气补充, 气体压力逐渐增大, 气流可能发生规模较大的逸散活动。在生烃增压作用下, 延长组油气流在古近纪向上运移, 为直罗组铀成矿改造或延安组铀成矿提供还原性流体。在生物气补充作用下, 延安组煤层气中具有还原性组分的中间产物也不断得到补充, 引发的气体逸散为直罗组砂岩提供了有利的铀成矿条件。

5 结 论

a. 黄陵地区中生代含煤岩系油气与铀成矿在空间分布上具有密切联系。中生代铀矿目的层为直罗组和延安组, 铀矿(点)主要分布在基岩剥蚀边界或小型断裂周缘的辫状河三角洲和河湖相沉积岩系中。

b. 铀伴生蚀变矿物主要有后生方解石和黄铁矿等; 侏罗系还原性含烃流体组分包含亲铁元素、亲硫元素、碱性金属元素等, 延安组生物成因煤层气中间产物也含有部分还原性组分及二氧化碳; 从矿物组成与形成机理来看, 中生代含煤岩系烃类流体组分(尤其是延长组油气)与黄铁矿、方解石等与铀的伴生蚀变矿物具有密切联系。

c. 中生代含煤岩系烃源岩主生烃期为早白垩世中期至晚白垩世早期(118 Ma~95 Ma), 古近纪以来的构造活动可能引发大规模排烃作用; 此外, 从早侏罗世开始不断有生物气生成。中生代含煤岩系铀矿主成矿期为晚白垩世之后(52.6±2.2) Ma~(41.8±9.3) Ma。在时序上, 中生代含煤岩系主生烃期和排烃期早于铀的主成矿期, 因而油气可能通过运移影响铀成矿作用。

参考文献

- [1] 邢秀娟, 柳益群, 樊爱萍, 等. 鄂尔多斯盆地店头地区砂岩型铀矿成因初步探讨[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 591-597.
XING Xiujuan, LIU Yiqun, FAN Aiping, et al. Genesis of sandstone-type uranium deposits: A case study in the Diantou area of the Ordos basin[J]. Geology in China, 2006, 33(3): 591-597.
- [2] 贾立城, 刘武生. 鄂尔多斯盆地东南部直罗组油气流体活动特征与铀成矿作用初探[J]. 世界核地质科学, 2012, 29(2): 78-84.
JIA Licheng, LIU Wusheng. Preliminary research on oil-gas fluid activity character and uranium mineralization of Zhiluo Formation in southeast of Ordos basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2012, 29(2): 78-84.

- [3] 张云霞, 陈纯芳, 宋艳波, 等. 鄂尔多斯盆地南部中生界烃源岩特征及油源对比[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 173-177. ZHANG Yunxia, CHEN Chunfang, SONG Yanbo, et al. Features of Mesozoic source rocks and oil-source correlation in southern Ordos basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 173-177.
- [4] 刘阳, 曹惠锋, 计波, 等. 鄂尔多斯盆地南部双龙地区铀储层空间分布与成因[J]. 中国西部科技, 2015, 14(5): 32-34. LIU Yang, CAO Huifeng, JI Bo, et al. The spatial distribution and genesis of uranium reservoir in Shuanglong area, south Ordos basin[J]. Science and Technology of West China, 2015, 14(5): 32-34.
- [5] 张字龙, 范洪海, 蔡煜琦, 等. 鄂尔多斯盆地黄陵地区直罗组有机地球化学特征及其与铀成矿关系[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3408-3423. ZHANG Zilong, FAN Honghai, CAI Yuqi, et al. The organic geochemical characteristics of the Zhiluo Formation and its relationship with uranium mineralization in the Huangling area, Ordos basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(12): 3408-3423.
- [6] 李晓翠, 刘武生, 贾立城, 等. 鄂尔多斯盆地南部砂岩型铀矿成矿预测[J]. 铀矿地质, 2014, 30(5): 321-327. LI Xiaocui, LIU Wusheng, JIA Licheng, et al. Prognosis of sandstone hosted uranium deposit in southern Ordos basin[J]. Uranium Geology, 2014, 30(5): 321-327.
- [7] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型拗陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 19-28. ZHU Xiaomin, DENG Xiuqin, LIU Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large scale lacustrine: An example from triassic Yanchang Formation in Ordos basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 19-28.
- [8] 李士春, 冯朝荣, 殷世江. 鄂尔多斯盆地南部中生界延长组沉积体系与油气富集[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 79-83. LI Shichun, FENG Chaorong, YIN Shijiang. Sedimentary system and hydrocarbon enrichment of Yanchang Formation in southern Ordos basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(2): 79-83.
- [9] 何卫军. 鄂尔多斯盆地南部侏罗系直罗组-安定组沉积体系研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [10] 桂桂英, 冯景昌. 黄陵矿区煤、油、气共生概况及综合勘探的重要性[J]. 中国煤田地质, 1993, 5(3): 3-7. YU Guiying, FENG Jingchang. The symbiosis of coal, oil and gas in Huangling mining area and the importance of comprehensive exploration[J]. China Coal Geology, 1993, 5(3): 3-7.
- [11] 张字龙, 范洪海, 贺锋, 等. 鄂尔多斯盆地南缘彬县地区水文地球化学及铀成矿作用特征[J]. 地质通报, 2017, 36(4): 503-510. ZHANG Zilong, FAN Honghai, HE Feng, et al. Features of hydro-geochemistry and uranium metallogenesis in Binxian area on the southern margin of Ordos basin[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 503-510.
- [12] 彭小华, 曹惠锋, 刘厚宁. 鄂尔多斯盆地南部双龙地区铀成矿特征分析[J]. 世界核地质科学, 2018, 35(1): 8-15. PENG Xiaohua, CAO Huifeng, LIU Houning. Analysis on uranium metallogenic characteristics in Shuanglong area, southern Ordos basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2018, 35(1): 8-15.
- [13] 李君权, 李海飞, 李晓峰, 等. 鄂尔多斯盆地黄陵地区延长组烃源岩特征评价[J]. 化学工程与装备, 2015(4): 140-143. LI Junquan, LI Haifei, LI Xiaofeng, et al. Evaluation of hydrocarbon Source rocks of Yanchang Formation in Huangling area of Ordos basin[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(4): 140-143.
- [14] 张海林, 邓南涛, 李强, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组烃源岩分布及其地球化学特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 31-43. ZHANG Hailin, DENG Nantao, LI Qiang, et al. Distribution and geochemistry characteristic of the source rocks from Yanchang Formation in the southern part of Ordos basin[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2015, 51(1): 31-43.
- [15] 屈红军, 杨县超, 曹金舟, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深层油气聚集规律[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 243-248. QU Hongjun, YANG Xianchao, CAO Jinzhou, et al. Oil accumulation rules in deep zones of upper triassic Yanchang Formation in Ordos basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 243-248.
- [16] 陈飞, 胡光义, 孙立春, 等. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组层序地层格架内沉积相特征与演化[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 321-330. CHEN Fei, HU Guangyi, SUN Lichun, et al. Characteristics of sedimentary facies and evolution in sequence stratigraphic framework of the upper triassic Yanchang Formation in southern Ordos basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 321-330.
- [17] 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 443-455. DENG Xiuqin, FU Jinhua, YAO Jingli, et al. Sedimentary facies of the middle-upper triassic Yanchang Formation in Ordos basin and breakthrough in petroleum exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 443-455.
- [18] 田文广, 邵龙义, 张继东, 等. 鄂尔多斯盆地南部侏罗系煤层气成因探究[J]. 中国矿业, 2015, 24(5): 81-85. TIAN Wenguang, SHAO Longyi, ZHANG Jidong, et al. Analysis of genetic types of the coalbed methane of Jurassic Formation, southern Ordos basin[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(5): 81-85.
- [19] 黄彩霞, 张枝焕, 李宇翔, 等. 鄂尔多斯盆地南部地区延长组烃源岩生烃动力学研究及模拟结果分析[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(8): 21-27. HUANG Caixia, ZHANG Zhihuan, LI Yuxiang, et al. Hydrocarbon generation kinetics and simulation result analysis of source rocks in Yanchang Formation of the southern Ordos basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology(Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2013, 35(8): 21-27.
- [20] 李洪英, 赫英, 杨磊, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘煤中沥青微量元素和稀土元素特征[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(2): 159-162. LI Hongying, HE Ying, YANG Lei, et al. Characteristics of bitumen trace elements and rare earth elements of coal in south-eastern margin of Ordos basin[J]. Xin Jiang Petroleum Geology, 2008, 29(2): 159-162.

- LIU Xiaoxue, TANG Chao, SIMA Xianzhang, et al. Major elements geochemical characteristics of sandstone-type uranium deposit in north-east Ordos basin and its geological implications[J]. Geological Survey and Research, 2016, 39(3): 169–176.
- [23] 冯晓曦, 金若时, 司马献章, 等. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿田铀源示踪及其地质意义[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 993–1005.
- FENG Xiaoxi, JIN Ruoshi, SIMA Xianzhang, et al. Uranium source analysis and its geological significance to uranium metallogenetic evolution in Dongsheng uranium ore field[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 993–1005.
- [24] 焦养泉, 陈安平, 王敏芳, 等. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析: 砂岩型铀矿床预测的空间定位基础[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 371–379.
- JIAO Yangquan, CHEN Anping, WANG Minfang, et al. Genetic analysis of the bottom sandstone of Zhiluo Formation, northeastern Ordos basin: Predictive base of spatial orientation of sandstone-type uranium deposit[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 371–379.
- [25] 易超, 郑云龙, 王明太. 东胜地区直罗组铀储层非均质性特征及其与铀成矿的关系[J]. 铀矿地质, 2013, 29(3): 139–145.
- YI Chao, ZHENG Yunlong, WANG Mingtai. Heterogeneity of uranium host rocks in Zhiluo Formation in Dongsheng area and its relation to uranium mineralization[J]. Uranium Geology, 2013, 29(3): 139–145.
- [26] 陈路路, 冯晓曦, 司马献章, 等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟地区铀矿物赋存形式研究及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2017, 53(4): 632–642.
- CHEN Lulu, FENG Xiaoxi, SIMA Xianzhang, et al. Occurrence forms of the uranium minerals in the Nalinggou area of the Ordos basin and geological implications[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(4): 632–642.
- [27] 王贵, 王强, 苗爱生, 等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀矿物特征与形成机理[J]. 矿物学报, 2017, 37(4): 461–468.
- WANG Gui, WANG Qiang, MIAO Aisheng, et al. Characteristic of uranium minerals in Nalinggou uranium deposit of Ordos basin and their formation mechanism[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2017, 37(4): 461–468.
- [28] 金若时, 程银行, 李建国, 等. 中国北方晚中生代陆相盆地红–黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 205–223.
- JIN Ruoshi, CHENG Yinhang, LI Jianguo, et al. Late Mesozoic continental basin “Red and Black beds” coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China[J]. Geology in China, 44(2): 205–223.
- [29] 高俊义. 呼斯梁地区砂岩型铀矿成矿古水文地质条件分析[C]//全国铀矿大基地建设学术研讨会论文集(下). 海口: 2012.
- [30] 李卫红, 徐高中. 鄂尔多斯盆地后期改造与砂岩型铀成矿关系[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 19–23.
- LI Weihong, XU Gaozhong. Relationship between late reformation and formation of sandstone-type uranium ore in Ordos basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(3): 19–23.
- [31] 彭云彪, 陈安平, 焦养泉. 鄂尔多斯盆地北部中、新生代构造演化与大规模砂岩型铀成矿作用[J]. 矿物学报, 2007, 27(专题 1): 110–111.
- PENG Yunbiao, CHEN Anping, JIAO Yangquan. Mesozoic–Cenozoic tectonic evolution and large-scale sandstone-type uranium mineralization in northern Ordos basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(Z1): 110–111.
- [32] 易超, 陈心路, 李西得, 等. 鄂尔多斯盆地北东部古层间氧化带砂岩型铀矿成矿特征[J]. 铀矿地质, 2015, 31(增刊 1): 247–257.
- YI Chao, CHEN Xinlu, LI Xide, et al. Metallogenetic characteristic of the paleo-interlayer oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in northeastern Ordos basin[J]. Uranium Geology, 2015, 31(S1): 247–257.

(责任编辑 范章群)

(上接第 21 页)

- [21] 李洪英, 赫英, 杨磊, 等. 鄂尔多斯盆地石油中沥青的地球化学特征[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(3): 313–315.
- LI Hongying, HE Ying, YANG Lei, et al. Geochemical characteristics of oil bitumen in Ordos basin[J]. Xin Jiang Petroleum Geology, 2009, 30(3): 313–315.
- [22] 晋香兰, 张泓. 鄂尔多斯盆地侏罗系低煤阶煤层气系统演化[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(5): 17–24.
- JIN Xianglan, ZHANG Hong. Evolution of Jurassic low rank coal CBM system in Ordos basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(5): 17–24.
- [23] 李小彦, 司胜利. 鄂尔多斯盆地煤的热解生烃潜力与成烃母质[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(3): 1–5.
- LI Xiaoyan, SI Shengli. The hydrocarbon potential and precursor types coal pyrogenation in Ordos basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(3): 1–5.
- [24] 刘春艳, 于建青, 江小青. 生物气形成过程中氢元素的来源[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2014, 16(4): 1–3.
- LIU Chunyan, YU Jianqing, JIANG Xiaoping. Characteristics of hydrogen isotope in bio-methane production[J]. Chengde Petroleum College Journal, 2014, 16(4): 1–3.
- [25] 黄志刚, 任战利, 高龙刚. 鄂尔多斯盆地东南缘白垩纪以来构造演化的裂变径迹证据[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3753–3764.
- HUANG Zhigang, REN Zhanli, GAO Longgang. Evidence from detrital zircon and apatite fission track for tectonic evolution since cretaceous in southeastern margin of Ordos basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3753–3764.
- [26] 司马献章, 金若时, 苗培森, 等. 中国陆相盆地沉积建造组合对砂岩型铀矿的控制作用[J]. 矿床地质, 2016, 35(增刊 2): 221–222.
- SIMA Xianzhang, JIN Ruoshi, MIAO Peisen, et al. Control of sandstone-type uranium deposits by sedimentary combination of continental basins in China[J]. Deposit Geology, 2016, 35(S2): 221–222.

(责任编辑 聂爱兰)