



松辽盆地西部斜坡区四方台组砂岩中烃类流体特征与铀成矿关系

罗 敏, 李军业, 刘晓辉, 卢胜军

核工业 240 研究所, 辽宁 沈阳 110032

摘 要: 通过对松辽盆地西部斜坡区四方台组 33 个砂岩样品的酸解烃分析, 探讨了酸解烃中烃类气体组成特征、成因及来源, 并结合该地区铀矿化地质特征初步分析了烃类流体与砂岩型铀成矿关系。酸解烃中气体组成特征参数 $C_1/\sum C$ 、 C_1/C_{2+} 、 C_2/iC_4 、 C_2/C_3 、 iC_4/nC_4 、 iC_5/nC_5 特征表明, 四方台组底部砂岩中烃类气体为有机成因的油气型, 烃类气主要处于成熟—高成熟阶段, 是原油裂解气和原油伴生的混合气, 它们主要沿盖层断裂运移到四方台组底部砂岩中。西部斜坡区四方台组含铀砂岩中烃类流体含量普遍增高, 表明该区四方台组铀矿化与烃类气体关系密切。四方台组底部靠近沟通油气田的盖层断裂附近是西部斜坡区砂岩型铀矿找矿的重点地区。

关键词: 砂岩型铀矿; 油气; 酸解烃; 四方台组; 松辽盆地

SANDSTONE OF SIFANGTAI FORMATION IN THE WESTERN SLOPE OF SONGLIAO BASIN: Relation Between Hydrocarbon Fluid Characteristics and Uranium Mineralization

LUO Min, LI Jun-ye, LIU Xiao-hui, LU Sheng-jun

No. 240 Institute, CNNC, Shenyang 110032, China

Abstract: By analyzing the acidolysis hydrocarbon in 33 sandstone samples from Sifangtai Formation in the western slope of Songliao Basin, the paper discusses the composition, genesis and origin of hydrocarbon gas, and preliminarily analyzes the relation between hydrocarbon fluids and sandstone-type uranium metallogenesis combined with the geological characteristics of uranium mineralization in the area. The characteristic parameters of $C_1/\sum C$, C_1/C_{2+} , C_2/iC_4 , C_2/C_3 , iC_4/nC_4 and iC_5/nC_5 for gas compositions in acidolysis hydrocarbon show that the hydrocarbon gas in the bottom sandstone of Sifangtai Formation is of organic origin, mainly in the maturity-high maturity stage, which are crude oil cracking gas and associated mixture gas, migrating to the bottom sandstone along superficial faults. The content of hydrocarbon fluids in uranium-bearing sandstone of Sifangtai Formation is generally increased, indicating the uranium mineralization is closely related to hydrocarbon gases. The place near the superficial fault connecting the bottom of Sifangtai Formation and oil-gas field is the key area for sandstone-type uranium deposit prospecting in the western slope.

Key words: sandstone-type uranium deposit; oil and gas; acidolysis hydrocarbon; Sifangtai Formation; Songliao Basin

松辽盆地是大型陆相中新世代沉积盆地, 也是中国重要的油气产地。近几年, 在盆地南部已发现 2 处

中型铀矿床^[1], 盆地北部的铀矿找矿工作则相对薄弱。最近在盆地北部西部斜坡区开展的钻探揭露和研究显

收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-05-29. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国核工业地质局铀矿地质调查评价项目“黑龙江齐齐哈尔市泰来地区铀矿资源调查评价”(编号 201722-1).

作者简介: 罗敏(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事铀矿地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市 760 信箱, E-mail//89581492@qq.com

示,该区发现的铀矿化主要产在四方台组,铀矿化与油气作用关系密切,直接证据就是多个钻孔揭露到四方台组底部富含烃类流体的黑色砂岩、深灰色砂岩,均伴有铀矿化,部分钻孔已达到工业铀矿孔.借鉴我国其他产铀盆地的特征^[2-7],本文主要根据四方台组砂岩中酸解烃组分特征分析,探讨四方台组底部含铀砂岩中油气的成因及来源.结合西部斜坡区油气运移研究,探讨该地区四方台组油气与砂岩型铀成矿的关系,为松辽盆地北部铀矿找矿提供依据.

1 区域地质背景

松辽盆地西部斜坡区在构造上由泰康隆起带、西部超覆带和富裕构造带3个二级构造带组成,整体上一个平缓的东倾大型单斜^[8],地层向西逐渐超覆尖灭^[9].地层倾角较小,一般小于 2° .松辽盆地是典型的裂陷盆地,构造演化经历裂陷期前、裂陷、拗陷和反转4个阶段^[10-11],沉积盖层纵向具有断陷层、拗陷层和反转构造层三层构造.其中拗陷层和反转构造层为铀成矿潜在层位,区内地层自下而上主要发育下白垩统泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组,古近系、新近系和第四系.

根据统计石油部门施工的含放射性增高的钻孔,认为松辽盆地北部主要发育2个铀矿化目的层组合,以嫩江组二段、青山口组一段做为区域隔水层.上部目的层组合以四方台组为主,兼顾明水组和嫩江组三四五段,该目的层组合中已发现的铀矿化多发育在油气田之上;下部目的层组合以青山口组二三段为主,兼顾嫩江组一段和姚家组,该目的层组合中已发现的铀矿化多发育在盆地西部边缘,油气发育区外围靠近蚀源区一侧^①.本文主要论述产于四方台组中的铀矿化.

2 样品采集与分析方法

本次分析的样品均来自西部斜坡区5个钻孔中四方台组底部砂岩岩心(图1),包括黑色、灰色、浅红色、褐红色和黄色砂岩.野外采集的岩心样品经过自然晾干后,使用研钵将其捣碎、混匀;然后用天平称取50g样品置于烧瓶中,加入盐酸使样品中碳酸盐矿物发生分解,释放出来的气体经碱性溶液装置除去二氧化碳(CO_2)气体;待烧瓶中酸解完成后(不在产生气泡),用

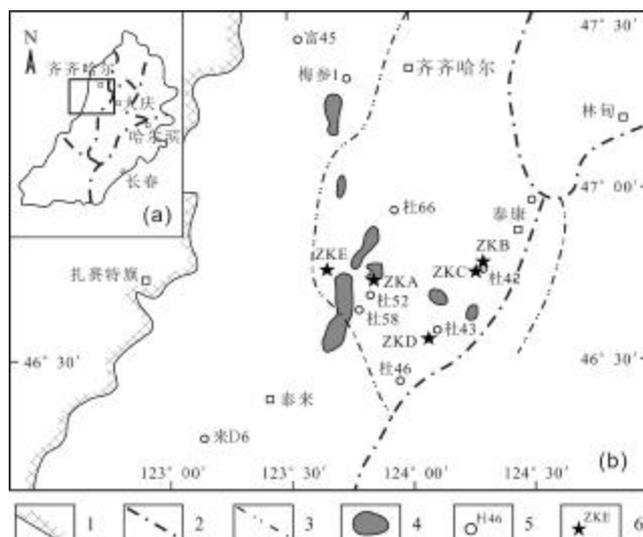


图1 研究区采样钻孔及油田分布图

Fig. 1 Distribution map of boreholes and oil fields in the study area a—松辽盆地范围(Songliao Basin); b—研究区(study area); 1—盆地边界 (basin boundary); 2—一级构造单元分界线 (boundary of first-order tectonic unit); 3—二级构造单元分界线 (boundary of second-order tectonic unit); 4—油气田(oil-gas field); 5—石油钻孔(oil borehole); 6—采样钻孔(sampling borehole)

微量注射器抽取一定量的气体,进行烃类气体组分含量测试.酸解烃组分分析在核工业203研究所完成,铀(U)含量分析在核工业东北分析测试中心完成,其中酸解烃组分分析测试仪器为GC7890F气相色谱仪,分析项目包括甲烷(C_1)、乙烷(C_2)、丙烷(C_3)、正/异丁烷(nC_4/iC_4)及正/异戊烷(nC_5/iC_5)含量,分析误差小于5%;U含量分析使用仪器为Finnigan-MAT公司生产的Element型号的高分辨电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),分析误差小于3%,分析结果见表1.

3 四方台组砂岩中烃类气体地球化学特征及来源

一些学者将烃类气体的来源分为3类:生物成因气、油型气和煤型气^[12].通过对国内外多个含油气盆地中大量酸解烃组分特征统计分析认为,可利用 $\text{C}_1/\sum\text{C}$ (代表 C_{1-5} 烃类总量)、 C_1/C_{2+} (代表 C_{2-5} 烃类总量)参数判别烃类气体的成因^[13],生物成因气 $\text{C}_1/\sum\text{C}$ 值分布在0.99~1.0之间, $\text{C}_1/\text{C}_{2+}>100$,其值明显高于油型气和煤型气;油型气的 $\text{C}_1/\sum\text{C}$ 值主要分布在0.70~0.98之间,其 C_1/C_{2+} 值分布在2~10之间;煤型气的 $\text{C}_1/\sum\text{C}$ 值分布在0.90~0.99之间、 C_1/C_{2+} 值分布在10~

①罗敏.黑龙江省齐齐哈尔市泰来地区铀矿资源调查评价报告,2020.

表 1 松辽盆地西部斜坡区四方台组砂岩酸解烃特征及铀含量

Table 1 Characteristics of acidolysis hydrocarbon and uranium content in sandstone of Sifangtai Formation

序号	样 品 描 述	U	C ₁	C ₂	C ₃	nC ₄	iC ₄	nC ₅	iC ₅	C ₁ /C ₂	C ₁ /ΣC	iC ₄ /nC ₄	iC ₅ /nC ₅
ZKA-1	黑色含砾细砂岩	164	4912	362	89.3	27.7	9.89	7.26	7.42	9.75	0.91	0.36	1.02
ZKA-2	黑色含砾细砂岩	135	11047	943	216	67.2	32.5	17.7	24.8	8.49	0.89	0.48	1.40
ZKA-3	黑色含砾细砂岩	118	14757	1194	260	74.0	40.8	15.9	27.9	9.15	0.90	0.55	1.75
ZKA-4	黑色含砾细砂岩	116	21110	1752	420	130	75.0	31.1	57.3	8.56	0.90	0.58	1.84
ZKA-5	黑色含砾细砂岩	106	20772	1705	408	127	64.5	30.9	52.3	8.70	0.90	0.51	1.69
ZKA-6	黑色含砾细砂岩	120	11635	1016	253	77.8	32.5	18.9	26.6	8.17	0.89	0.42	1.41
ZKA-7	黑色含砾细砂岩	115	11164	1032	249	76.0	32.5	19.3	26.8	7.78	0.89	0.43	1.39
ZKA-8	黑色含砾细砂岩	110	10077	917	216	67.1	28.6	16.8	22.8	7.95	0.89	0.43	1.36
ZKA-9	黑色含砾中砂岩	128	2162	176	60.7	26.3	15.2	6.03	11.1	7.32	0.88	0.58	1.84
ZKA-10	黑色含砾中砂岩	128	4617	350	104	32.0	18.6	7.10	14.0	8.78	0.90	0.58	1.97
ZKA-11	黑色含砾中砂岩	121	1672	130	39.3	12.3	6.96	3.33	5.58	8.47	0.89	0.57	1.68
ZKA-12	黑色含砾中砂岩	136	1541	117	33.0	10.0	5.55	3.05	4.73	8.89	0.90	0.56	1.55
ZKA-13	黑色含砾中砂岩	144	2068	160	43.3	14.4	5.85	4.43	5.61	8.85	0.90	0.41	1.27
ZKA-14	黑色含砾中砂岩	91.96	2704	212	54.9	16.5	6.95	4.24	4.98	9.03	0.90	0.42	1.17
ZKA-15	深灰色含砾中砂岩	150	11087	999	235	70.2	30.4	17.3	24.3	8.06	0.89	0.43	1.40
ZKA-16	深灰色含砾中砂岩	147	3170	251	70.2	20.6	9.74	4.68	6.52	8.74	0.90	0.47	1.39
ZKB-1	深灰色粗砂岩	125	672	76.2	26.9	9.58	2.55	1.85	2.60	5.61	0.85	0.27	1.41
ZKB-2	深灰色粗砂岩	67.17	670	102	38.7	11.6	2.62	2.64	2.33	4.19	0.81	0.23	0.88
ZKB-3	深灰色粗砂岩	80.06	1188	144	50.7	15.4	4.09	3.33	3.97	5.36	0.84	0.27	1.19
ZKB-4	深灰色粗砂岩	77.59	660	94.7	36.5	11.5	2.48	2.48	2.26	4.40	0.81	0.22	0.91
ZKB-5	深灰色粗砂岩	57.09	293	43.4	17.4	5.95	1.30	1.63	2.13	4.08	0.80	0.22	1.31
ZKB-6	深灰色中砂岩	143	1366	160	54.3	19.8	4.57	4.29	4.28	5.52	0.85	0.23	1.00
ZKB-7	深灰色中砂岩	128	1330	160	55.2	19.6	4.79	3.84	4.47	5.37	0.84	0.24	1.16
ZKB-8	深灰色中砂岩	185	1351	138	45.2	15.2	4.06	3.14	3.95	6.45	0.87	0.27	1.26
ZKC-1	浅红色中砂岩	0.99	1440	223	84.1	24.2	5.67	5.75	4.69	4.15	0.81	0.23	0.81
ZKC-2	浅红色粗砂岩	1.64	722	103	35.2	9.18	2.06	2.33	1.87	4.70	0.82	0.22	0.80
ZKC-3	浅红色含泥细砂岩	2.40	522	75.1	28.3	9.09	2.42	2.60	3.96	4.29	0.81	0.27	1.52
ZKC-4	浅红色含泥细砂岩	1.41	1516	236	81.0	20.1	4.85	4.16	3.48	4.33	0.81	0.24	0.84
ZKC-5	浅红色细砂岩	1.70	332	48.8	17.4	4.72	1.08	1.52	1.12	4.45	0.82	0.23	0.74
ZKD-1	褐红色细砂岩	1.17	891	113	40.6	11.5	3.70	2.78	3.15	5.10	0.84	0.32	1.13
ZKD-2	褐红色细砂岩	1.16	1016	142	52.2	14.6	5.59	4.09	5.96	4.53	0.82	0.38	1.46
ZKE-1	黄色细砂岩	2.07	243	39.6	15.8	4.78	1.00	1.63	1.25	3.80	0.79	0.21	0.76
ZKE-2	黄色细砂岩	1.66	469	71.7	26.8	7.63	1.92	1.78	1.40	4.22	0.81	0.25	0.78

含量单位:U 为 10⁻⁶,其他为 μL/kg.

100 之间. 根据上述特征, 建立了利用 $C_1/\sum C$ 、 C_1/C_2 关系判别烃类气成因的模板图(图 2), 将研究区样品投入该图中, 几乎全落入油型气范围内, 少许几个落入混合气范围. 表明西部斜坡区四方台组底部砂岩层中的烃类气主要是腐泥型母质生成的油型气. 干燥系数(C_1/C_{1-5})集中分布在 0.79~0.91 之间, 为典型的湿气, 表明四方台组砂岩层中的天然气主要处于低熟—高成熟的热演化阶段, 显示出原油伴生气的特征^[14].

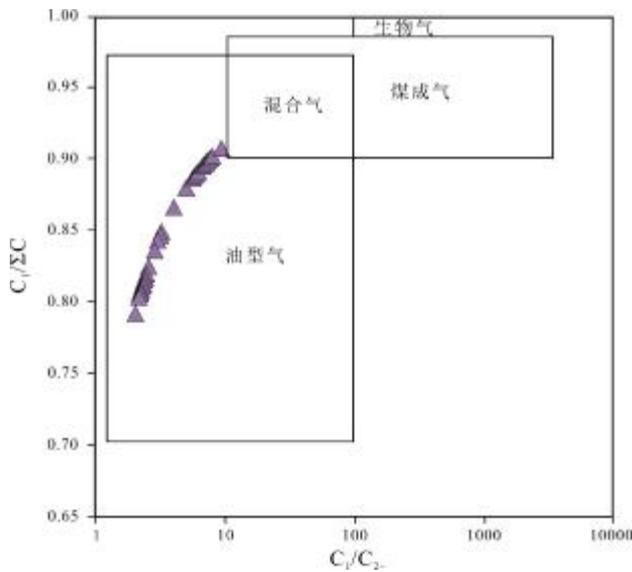


图 2 西部斜坡区四方台组砂岩烃类气体 $C_1/\sum C$ 与 C_1/C_2 图解
Fig. 2 The $C_1/\sum C$ vs. C_1/C_2 diagram showing genesis types of hydrocarbon gas in the sandstone of Sifangtai Formation

Hill et al.^[15] 根据原油裂解实验结果, 提出 C_2/iC_4 、 C_2/C_3 参数与天然气成熟度有很好的相关性, 可作为天然气成熟度的定性判别指标; 国内学者通过热模拟实验进一步提出干酪根裂解气与原油裂解气的 C_2/iC_4 、 C_2/C_3 界限值, 即 $C_2/iC_4 < 10$ 且 $C_2/C_3 < 2$ 为干酪根裂解气, 反之为原油裂解气^[16]. 西部斜坡区四方台组砂岩中烃类气的 C_2/C_3 值分布范围为 2.49~4.59, 平均为 3.31; C_2/iC_4 值分布范围较广, 分布在 11.58~50.04 之间, 平均为 31.87, 其值均大于 10(图 3). 以上特征表明, 西部斜坡区四方台组砂岩层中烃类气体主要来源于深部热演化程度较高的早期原油裂解气.

王云鹏等^[6] 根据不同成熟度下烃源岩与烷烃气中 iC_4/nC_4 、 iC_5/nC_5 关系建立了判别不同母质来源的天然气判别图版, 其中以 iC_4/nC_4 等于 0.9、 iC_5/nC_5 等于 0.85 作为原油裂解气与干酪根初次裂解气的界限值.

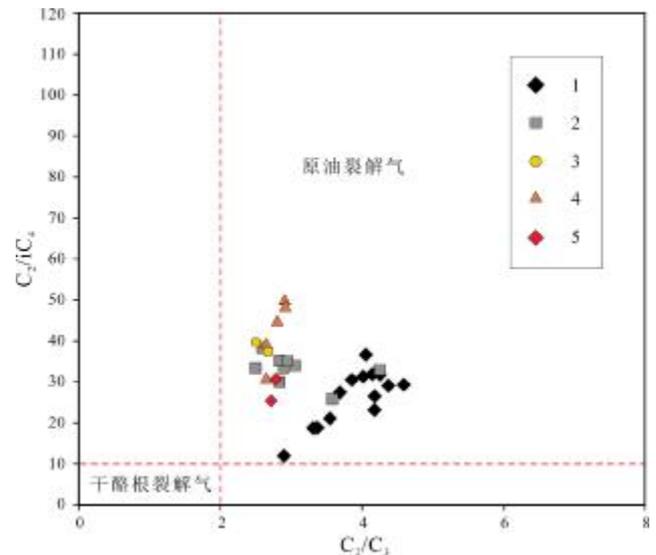


图 3 西部斜坡区四方台组砂岩烃类气体 C_2/iC_4 与 C_2/C_3 图解
Fig. 3 The C_2/iC_4 vs. C_2/C_3 diagram showing hydrocarbon gas types in the sandstone of Sifangtai Formation

1—黑色含粒细砂岩 (black gravel fine sandstone); 2—深灰色含粒中砂岩 (dark gray gravel medium-grained sandstone); 3—黄色细砂岩 (yellow fine sandstone); 4—浅红色砂岩 (pale red sandstone); 5—褐红色细砂岩 (maroon fine sandstone)

西部斜坡区四方台组含铀矿黑色砂岩中的天然气主要落入原油裂解气中的分散液态烃裂解气范围, 反映烃类气的成熟度较高, 表明含铀层中的烃类气是早期成熟阶段的部分原油在后期随地层温度增加裂解形成的天然气与原油伴生气组成的混合气. 同时烃类组分中的 iC_5/nC_5 值能很好地区分天然气的成因类型, 油型气中该比值小于 0.8, 而煤成气中该比值均大于 0.8^[17]. 西部斜坡区四方台组含铀矿黑色砂岩 iC_4/nC_4 分布范围在 0.36~0.58 之间, 平均值为 0.49(图 4), 表明该层位砂岩中的烃类气体主要为油型气.

Prinzhofer et al.^[18] 利用 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\ln(C_2/C_3)$ 相关图版判别现今天然气是干酪根初次裂解气还是原油的二次裂解气. 干酪根初次裂解气是以甲烷的快速成长为特征, 其天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 值较 $\ln(C_2/C_3)$ 值变化大, 在 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\ln(C_2/C_3)$ 关系图中趋势线几乎水平; 原油裂解产生的天然气 $\ln(C_2/C_3)$ 值的变化比 $\ln(C_1/C_2)$ 值更大, 在图中近乎直立^[17]. 西部斜坡区四方台组砂岩层中烃类气体的 $\ln(C_1/C_2)$ 值分布范围为 1.82~2.61, $\ln(C_2/C_3)$ 分布范围为 0.91~1.52, 整体上 $\ln(C_2/C_3)$ 值的变化比 $\ln(C_1/C_2)$ 值更大, 在图中近乎直立

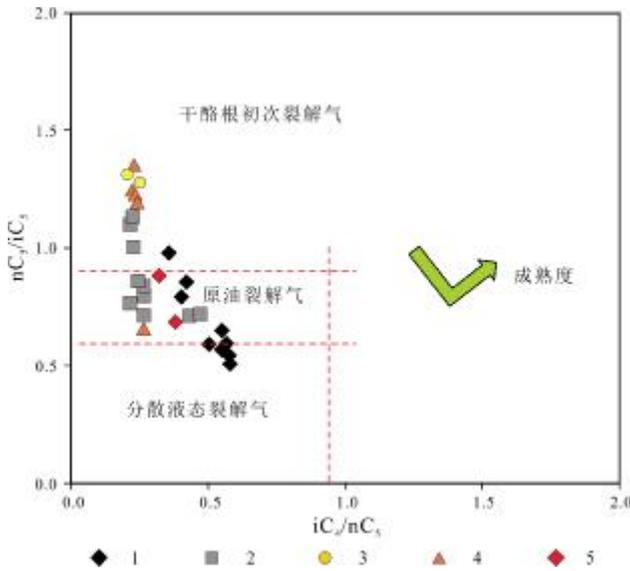


图4 西部斜坡区四方台组砂岩烃类气体 iC_4/nC_4 与 iC_5/nC_5 图解

Fig. 4 The iC_4/nC_4 vs. iC_5/nC_5 diagram showing origins of hydrocarbon gas in the sandstone of Sifangtai Formation

1—黑色含粒细砂岩 (black gravel fine sandstone); 2—深灰色含粒中砂岩 (dark gray gravel medium-grained sandstone); 3—黄色细砂岩 (yellow fine sandstone); 4—浅红色砂岩 (pale red sandstone); 5—褐红色细砂岩 (maroon fine sandstone)

(图5),表明该区烃类气体具有原油裂解气的特征. 结合前文分析,认为西部斜坡区四方台组含铀矿砂岩层中的烃类气应主要是原油裂解气.

4 烃类流体与铀成矿关系探讨

铀与油气的关系一直是砂岩型铀矿成矿理论中的重要研究内容. 含油气沉积盆地是寻找砂岩型铀矿床的良好场所,在合适的地质条件下,盆地中的铀矿床与油气田紧密共生. 既是产油盆地又是产铀盆地的例子如美国得克萨斯州海岸平原地区^[19-20]、我国鄂尔多斯盆地等.

辽河油田在松辽盆地南部开鲁地区胡力海洼陷钱12井区钻探施工中发现了70 m厚的放射性异常增高带,经进一步工作证实,在距地表500 m的下白垩统上部砂岩中存在厚7 m的工业铀矿体,而1000 m深的侏罗系砂岩却是较好的生油地层,并有油气显示^[21-23],这已表明松辽盆地南部钱家店铀矿床与油气具有密切的关系.

西部斜坡区目前已发现多个油气田,油气主要产于姚家组、青山口组和嫩江组一段. 研究认为^[24]:西部

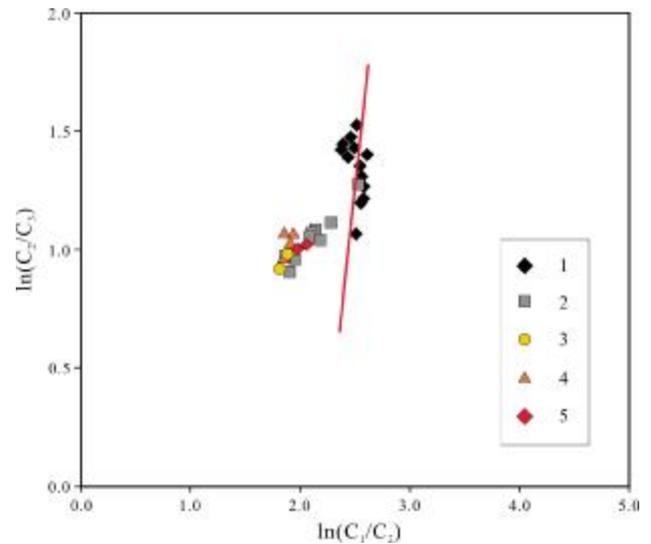


图5 西部斜坡区四方台组砂岩烃类气体

$\ln(C_1/C_2)$ - $\ln(C_2/C_3)$ 图解

Fig. 5 The $\ln(C_1/C_2)$ - $\ln(C_2/C_3)$ diagram showing genesis of hydrocarbon gas in the sandstone of Sifangtai Formation

1—黑色含粒细砂岩 (black gravel fine sandstone); 2—深灰色含粒中砂岩 (dark gray gravel medium-grained sandstone); 3—黄色细砂岩 (yellow fine sandstone); 4—浅红色砂岩 (pale red sandstone); 5—褐红色细砂岩 (maroon fine sandstone)

斜坡区北段的油气并非原地生成,主要来自齐家古龙凹陷的青山口组烃源岩,受断裂和嫩一、二段区域性盖层的控制,只有青山口组、姚家组和嫩江组一、二段有油气供给,是西部斜坡区油气勘探的主力层位. 油气通过3条路径运移至西部斜坡区,北部路径与滨州断裂走向相似,中部路径自他拉红气田至二站气田,南部路径与泰来至肇源断裂走向相似. 其中以中部路径为主要运移路径,运移的主要疏导通道是砂体^[25-26]. 通过最新的铀矿勘探成果,并统计具有放射性增高的石油钻分布情况发现,西部斜坡区四方台铀矿化(异常)平面分布主要位于油气运移路径附近,集中出现在沟通四方台组与油气的盖层断裂附近(图6).

受盆地构造反转挤压作用,发育局部断裂,切穿盖层,并且四方台组与下伏嫩江组、姚家组、青山口组富油层呈不整合接触关系,油气等还原剂可沿断裂和地层不整合面的高渗透层运移,直接还原含铀含氧水,使铀富集沉淀. 四方台组底部砂体经历了油气还原褪色改造,褪色砂体呈灰色、深灰色、黑色,为成矿提供了还原剂,提高了砂体的还原容量,且包藏于孔隙、裂隙中的烃类、 H_2S 、 CO_2 等还原物质也可作为还原剂直接参

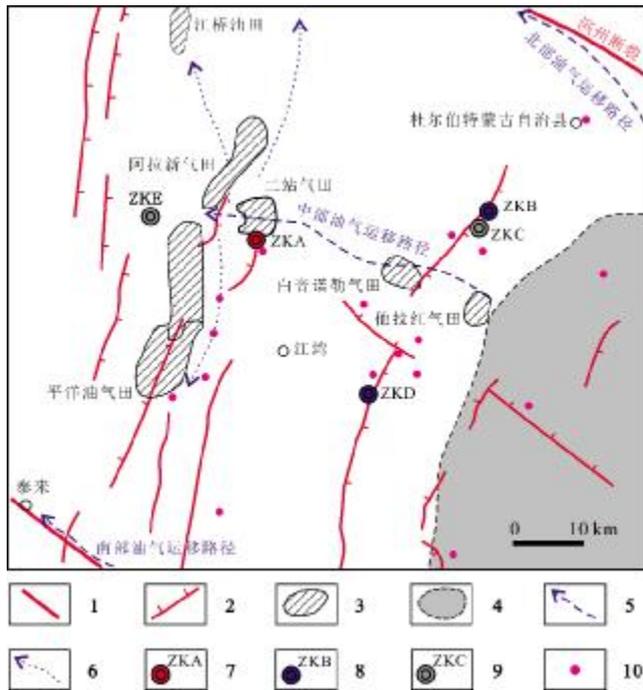


图6 泰康地段油气与四方台组铀异常分布平面图

Fig. 6 Distribution of oil-gas fields and uranium anomaly in Sifangtai Formation, Taikang area

1—基底断裂 (basement fault); 2—地震解译穿过 T06 反射层断裂 (seismic interpreted penetrating fault through T06 reflection layer); 3—油气田 (oil-gas field); 4— $R_0=0.7$ 的等值线 (内部为有效烃灶范围) (contour line of $R_0=0.7$, boundary of effective hydrocarbon); 5—油气运移主要通道 (main channel for oil-gas migration); 6—油气运移次要通道 (secondary channel for oil-gas migration); 7—铀工业孔及编号 (commercial uranium hole and number); 8—铀矿化孔及编号 (mineralized uranium hole and number); 9—无铀矿孔及编号 (uranium-free hole and number); 10—石油钻孔 (四方台组铀含量 > 100 API) (oil borehole, uranium content in Sifangtai fm. more than 100 API)

与氧化-还原作用,形成矿化. ZKA 井位于二站气田南部,紧邻气田,该孔四方台组底部发育厚度 4.5 m 的细砂岩,受到油气影响形成黑色油浸细砂岩,并造成铀富集,形成工业铀矿体. ZKA、ZKB 等孔矿化段均见油斑、大量炭屑及星点状黄铁矿, ZKA、ZKB 矿化段下部为发育裂隙的钙质砂砾岩、泥岩,深部油气沿着断裂上行还原细砂岩,后期含铀含氧水遇炭屑、黄铁矿、烃类使铀聚集成矿(图 7).

5 结论

(1)岩心样品分析结果显示,西部斜坡区四方台组已发现的含铀矿化砂岩均伴有酸解烃中的烷类增高.

(2)西部斜坡区四方台组含铀砂岩中的酸解烃气体组分以甲烷为主,根据相关特征参数分析认为,含铀砂岩中的烃类气体为有机成因的油型气,主要处于成熟—高成熟阶段,主要为原油裂解气.

(3)西部斜坡区四方台组铀矿化(异常)平面分布主要位于油气由中央凹陷区向西部斜坡区运移的通道附近,其中以沟通四方台组与深部油气的盖层断裂附近铀富集程度最好.

参考文献(References):

- [1]赵忠华,白景萍,赖天功. 松辽盆地北部反转构造与砂岩型铀成矿作用[J]. 铀矿地质, 2018, 34(5): 274-279.
Zhao Z H, Bai J P, Lai T G. Reversal structure and its relation to metallization of sandstone type uranium deposit in northern Songliao Basin[J]. Uranium Geology, 2018, 34(5): 274-279.
- [2]权建平,樊太亮,徐高中,等. 中国北方盆地中油气运移对砂岩型铀成矿作用讨论[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 470-477.
Quan J P, Fan T L, Xu G Z, et al. Effects of hydrocarbon migration on sandstone-type uranium mineralization in basins of northern China [J]. Geology in China, 2007, 34(3): 470-477.
- [3]周巧生,李占游. 吐哈盆地西南缘地浸砂岩型铀矿地质特征及找矿前景[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 186-191.
Zhou Q S, Li Z Y. Geological characteristics and ore prospects of underground leaching sandstone-type uranium deposits on the southwestern margin of the Turpan-Hami basin[J]. Geology in China, 2003, 30(2): 186-191.
- [4]邢秀娟,柳益群,樊爱萍. 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 X J, Liu Y Q, Fan A Y. 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.
- [5]赵兴齐,李西得,史清平,等. 鄂尔多斯盆地东胜区直罗组砂岩中烃类流体特征与铀成矿关系[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3381-3392.
Zhao X Q, Li X D, Shi Q P, et al. Hydrocarbon fluid feature of the Zhiluo formation sandstone in the Dongsheng area, Ordos basin and its relationship to uranium mineralization [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(12): 3381-3392.
- [6]王云鹏,田静. 原油裂解气的形成、鉴别与运移研究综述[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(2): 235-244.
Wang Y P, Tian J. Review of oil cracked gas formation, identification and migration[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(2): 235-244.
- [7]彭云彪,陈安平,方锡珩,等. 东胜砂岩型铀矿床中烃类流体与成矿关系研究[J]. 地球化学, 2007, 36(3): 267-274.
Peng Y B, Chen A P, Fang X H, et al. Relationship between

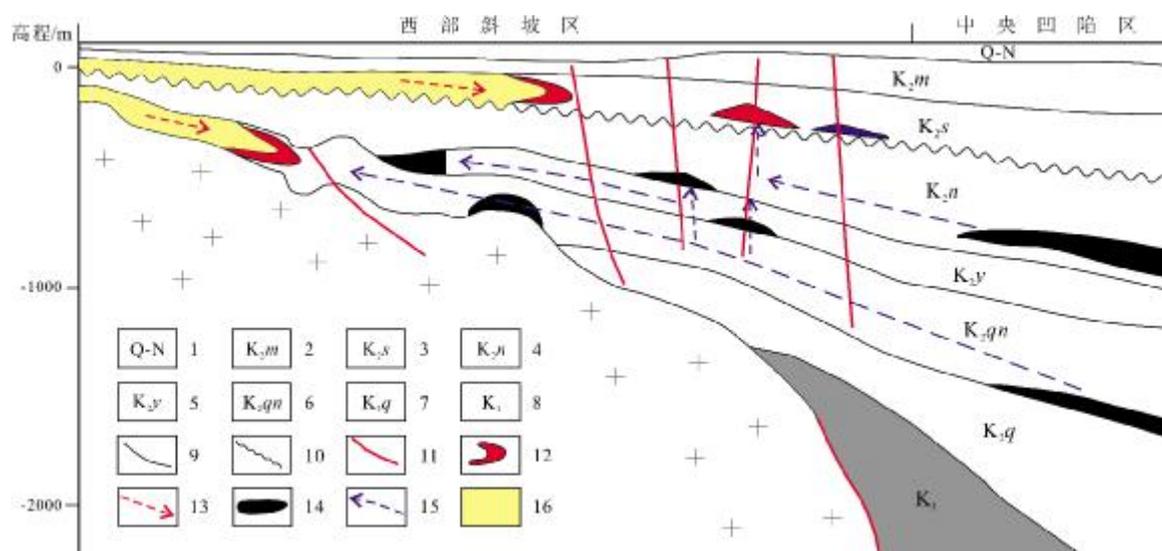


图7 泰康地段油气运移剖面示意图

Fig. 7 Schematic profile of oil-gas migration in Taikang area

1—第四系-新近系(Quaternary-Neogene); 2—明水组(Mingshui fm.); 3—四方台组(Sifantai fm.); 4—嫩江组(Nenjiang fm.); 5—姚家组(Yaojia fm.); 6—青山口组(Qingshankou fm.); 7—泉头组(Quantou fm.); 8—下白垩统(Lower Cretaceous); 9—地层界线(stratigraphic boundary); 10—不整合界线(unconformity); 11—断层(fault); 12—铀矿(化)体(uranium ore/mineralized body); 13—含铀含氧水运移方向(migration direction of uranium-bearing oxygenated water); 14—油气田(oil-gas field); 15—油气运移方向(oil-gas migration direction); 16—后生氧化范围(epigenetic oxidation)

hydrocarbon-containing fluid and metallogenesis in Dongsheng sandstone-type uranium deposit[J]. *Geochimica*, 36(3): 267-274.

[8]大庆油田石油地质编写组. 中国石油地质志(卷二)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993. (in Chinese)

[9]高瑞琪, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 10-50.

Gao R Q, Cai X Y. The forming conditions and distribution rules of oil-gas fields in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 10-50. (in Chinese)

[10]刘德来, 陈发景, 关德范, 等. 松辽盆地形成、发展与岩石圈动力学[J]. *地质科学*, 1996, 31(4): 397-408.

Liu D L, Chen F J, Guan D F, et al. A study on lithospheric dynamics of the origin and evolution in the Songliao Basin [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1996, 31(4): 397-408.

[11]胡望水, 吕炳全, 张文军, 等. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨[J]. *地质科学*, 2005, 40(1): 16-31.

Hu W S, Lü B Q, Zhang W J, et al. An approach to tectonic evolution and dynamics of the Songliao Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(1): 16-31.

[12]柳广弟, 张厚福. 石油地质学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2009.

Liu G D, Zhang H F. *Petroleum geology* [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.

[13]戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学: 卷一[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.

Dai J X, Pei X G, Qi H F. *Natural gas geology in China vol. 1* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.

[14]胡安平, 李剑, 张文正, 等. 鄂尔多斯盆地上、下古生界和中生界天然气地球化学特征及成因类型对比[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(S2): 157-166.

Hu A P, Li J, Zhang W Z, et al. The contrast geochemical characteristics and genesis types of natural gas from upper and lower Palaeozoic and Mesozoic, Ordos Basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(S2): 157-166. (in Chinese)

[15]Hill R J, Tang Y C, Kaplan I R. Insights into oil cracking based on laboratory experiments [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(12): 1651-1672.

[16]Zhang M, Huang G H, Hu G Y, et al. Geochemical study on oil cracked gases and kerogen-cracked gases (I)—Experimental simulation and products analysis [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(S1): 1-9.

[17]高岗, 王延斌, 韩德馨, 等. 煤的加水热模拟气特征对比[J]. *地质地球化学*, 2003, 31(1): 92-96.

Gao G, Wang Y B, Han D X, et al. Comparison of the characteristics of thermally simulative gas from two types of coal [J]. *Geology-Geochemistry*, 2003, 31(1): 92-96.

[18]Prinzhofer A A, Huc A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases [J]. *Chemical Geology*, 1995, 126(3/4): 281-290.

[19]刘武生, 赵兴齐, 史清平, 等. 中国北方砂岩型铀矿成矿作用与油

- 气关系研究[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 279-287.
- Liu W S, Zhao X Q, Shi Q P, et al. Research on relationship of oil-gas and sandstone-type uranium mineralization of northern China[J]. *Geology in China*, 2017, 44(2): 279-287.
- [20]刘建军, 李怀渊, 陈国胜. 利用铀油关系寻找可地浸砂岩型铀矿[J]. 铀矿地质, 2006, 22(1): 29-37.
- Liu J J, Li H Y, Chen G S. To prospect for ISL-amenable sandstone-type uranium deposit by using the association of uranium with oil[J]. *Uranium Geology*, 2006, 22(1): 29-37.
- [21]张振强, 董文明, 余新民, 等. 浅析油气对松辽盆地南部姚家组砂岩型铀矿成矿的作用[J]. 铀矿地质, 2008, 24(1): 43-47, 23.
- Zhang Z Q, Dong W M, She X M, et al. Primary studies on the role of oil-gas in sandstone type uranium mineralization of Yaojia formation in south Songliao basin [J]. *Uranium Geology*, 2008, 24(1): 43-47, 23.
- [22]冯子辉, 廖广志, 方伟, 等. 松辽盆地北部西斜坡区稠油成因与油源关系[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 25-28.
- Feng Z H, Liao G Z, Fang W, et al. Formation of heavy oil and correlation of oil-source in the western slope of the northern Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(4): 25-28.
- [23]商斐, 周海燕, 刘勇, 等. 松辽盆地嫩江组泥页岩有机质富集模式探讨——以嫩江组一、二段油页岩为例[J]. 中国地质, 2020, 47(1): 236-248.
- Shang F, Zhou H Y, Liu Y, et al. A discussion on the organic matter enrichment model of the Nenjiang Formation, Songliao Basin: a case study of oil shale in the 1st and 2nd members of the Nenjiang Formation [J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 236-248.
- [24]付晓飞, 王朋岩, 申家年, 等. 简单斜坡油气富集规律——以松辽盆地西部斜坡北段为例[J]. 地质论评, 2006, 52(4): 522-531.
- Fu X F, Wang P Y, Shen J N, et al. Migration and accumulation of oil and gas in a simple slope area: a case study on the western slope of the northern Songliao Basin [J]. *Geological Review*, 2006, 52(4): 522-531.
- [25]张敏, 黄光辉, 胡国艺, 等. 原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究(I)—模拟实验和产物分析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(S2): 1-8.
- Zhang M, Huang G H, Hu G Y, et al. Geo-chemical research of kerogen-crackened gases and oil-cracked gases (I): simulation experiments and product analysis [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 38(S2): 1-8. (in Chinese)
- [26]向才富, 夏斌, 解习农, 等. 松辽盆地西部斜坡带油气运移主导通道[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 204-208, 215.

(上接第 172 页/Continued from Page 172)

- [15]李欣伟, 杜彦军, 席建桢, 等. 鄂尔多斯盆地海子塌地区长 6 油层组测井曲线标准化研究[J]. 地质与资源, 2018, 27(2): 192-198.
- Li X W, Du Y J, Xi J Z, et al. Log curve normalization of C-6 oil-bearing formation in Haizita Area, Ordos Basin [J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(2): 192-198.
- [16]张志垚, 张昌民, 侯国伟, 等. 东海盆地某凹陷 P 井区平湖组沉积微相及沉积模式[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 142-151, 160.
- Zhang Z Y, Zhang C M, Hou G W, et al. Microfacies distribution and sedimentary model of Pinghu Formation in P Well Area, East China Sea Basin [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(2): 142-151, 160.
- [17]牛雪, 焦鹏程, 曹养同, 等. 青海察尔汗盐湖别勒滩区段杂卤石成因及其成钾指示意义[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2087-2095.
- Niu X, Jiao P C, Cao Y T, et al. The origin of polyhalite and its indicating significance for the Potash Formation in the Bieletan Area of the Qarhan Salt Lake, Qinghai [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 2087-2095.
- [18]杨生鹏, 刁俊魏, 周钰邦, 等. 青海海西 W 地区卤水钾盐矿的地球物理测井响应特征[J]. 科技创新与应用, 2019(4): 69-70.
- Yang S P, Diao J W, Zhou Y B, et al. Geophysics logging response characteristics of brine potash mine in Haixi W area, Qinghai Province [J]. *Technology Innovation and Application*, 2019(4): 69-70. (in Chinese)
- [19]李大潜, 蔡志杰, 陈妮, 等. 自然电位测井数学模型与求解方法[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 211-224.
- Li D Q, Cai Z J, Chen W, et al. Mathematical modeling and numerical method for the spontaneous potential well-logging [J]. *Well Logging Technology*, 2012, 36(3): 211-224.
- [20]潘保芝, 段亚男, 张海涛, 等. BFA-CM 最优化测井解释方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 391-398.
- Pan B Z, Duan Y N, Zhang H T, et al. BFA-CM optimization log interpretation method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(1): 391-398.
- [21]李延丽, 王建功, 石亚军, 等. 柴达木盆地西部盐湖相有效烃源岩测井识别[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 69-75.
- Li Y L, Wang J G, Shi Y J, et al. Logging identification of effective source rocks in salt-lake facies in western Qaidam Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(6): 69-75.