

文章编号: 0253-2697(2024)10-1462-18 DOI:10.7623/syxb202410002

# 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩的岩浆热液作用证据

何文渊<sup>1,2</sup> 白雪峰<sup>2</sup> 王瑞<sup>2</sup> 钟建华<sup>3,4,5</sup> 孙宁亮<sup>3,4,6</sup>

(1. 中国石油国际勘探开发有限公司 北京 100034; 2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室 黑龙江大庆 163712;  
3. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院 河北秦皇岛 066004; 4. 海洋油气勘探国家工程研究中心 北京 100028;  
5. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛 266580; 6. 东北大学海洋工程研究院 河北秦皇岛 066004)

**摘要:**为解释古龙凹陷青山口组在浅埋深(2000~2600 m)条件下轻质油的形成机理,通过背散射图像、能谱、稀土元素、碳-氧同位素和流体包裹体分析,以及岩心和岩石薄片观察,发现了古龙凹陷青山口组页岩油普遍遭受岩浆热液作用的证据,并对其进行了分析。岩浆热液作用的证据主要包括:①页岩油储层中发现了与岩浆热液作用相关的黄铜矿、自然铜、闪锌矿及二硫化锌矿、辉银矿及硫化银矿、Fe-Cr-Ni-Ti 及 Ni-Fe-Mo 合金、重晶石、氟磷灰石和氧化钛矿物等;②在样品渗出油中检测到铌、钽、钨和汞等高温岩浆热液元素;③在遭受岩浆热液蚀变作用的岩心中,方解石脉中盐水包裹体高温段的均一温度为 130.0~166.8 °C,高于非热液蚀变岩心中方解石脉的正常温度(30~58 °C);④碳-氧同位素及稀土元素分析均反映古龙凹陷青山口组页岩经受了岩浆热液作用;⑤在齐家-古龙凹陷北部的金 X 井和中部的英页 Y 井,岩心中均发现大量岩浆热液作用证据,包括“玻璃”、球粒、角岩、气孔和杏仁等构造。从区域上讲,古龙凹陷深部存在一个磁性异常、重力异常和电性异常带,地震剖面也揭示古龙凹陷基底存在大面积连片岩浆热液带,其下正好有一个地垒,其两侧的正断层为岩浆热液上侵到青山口组页岩创造了条件。金 X 井钻遇岩墙状侵入体,岩心内发育强烈的岩浆热液蚀变现象。岩浆热液作用证据的发现对于研究古龙凹陷青山口组页岩的储集空间及页岩油的分布具有重要意义。

**关键词:**岩浆热液作用;热液矿物;页岩油;青山口组;古龙凹陷

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

## Evidence of magmatic hydrothermal action in the shale of Qingshankou Formation of Gulong sag, Songliao Basin

He Wenyuan<sup>1,2</sup> Bai Xuefeng<sup>2</sup> Wang Rui<sup>2</sup> Zhong Jianhua<sup>3,4,5</sup> Sun Ningliang<sup>3,4,6</sup>

(1. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100034, China; 2. National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Heilongjiang Daqing 163712, China;  
3. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Hebei Qinhuangdao 066004, China;  
4. National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100028, China;  
5. School of Geosciences, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China;  
6. Ocean Engineering Research Institute, Northeastern University, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** To explain the formation mechanism of light oil in Qingshankou Formation of Gulong sag under the condition of shallow burial depth (2000 m to 2600 m), based on the analyses of back scattered images, energy spectra, rare earth elements, carbon and oxygen isotopes, fluid inclusions, as well as the observation of cores and thin sections, the evidence that the shale oil of Qingshankou Formation in Gulong sag was subjected to magmatic hydrothermal action was found and analyzed. The evidences of magmatic hydrothermal action mainly include as follows. (1) The minerals related to magmatic hydrothermal solution were discovered in shale oil reservoirs, including chalcopyrite, copper, pyrite, sphalerite and zinc disulfide, argentite and silver sulfide, Fe-Cr-Ni-Ti and Ni-Fe-Mo alloys, barite, fluorapatite, and titanium oxide. (2) High temperature magmatic hydrothermal solution elements such as Nb, Ta, W, and Hg were detected in the oil seeped out of the sample. (3) In the core subjected to magmatic hydrothermal alteration, the homogenization temperature for the high temperature section of the saline inclusions of calcite vein ranges from 130.0 °C to 166.8 °C, which is higher than the normal temperature of calcite veins in non-hydrothermal altered cores (30 °C to 58 °C). (4) The analysis results of carbon-oxygen isotopes and rare earth elements reflect that the Qingshankou Formation shale of Gulong sag has undergone

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 42072138, No. 41572088)、中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“大庆古龙页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021ZZ10)、黑龙江省“百千万”工程科技重大专项“松辽盆地北部古龙页岩油成藏条件及甜点分布规律研究”(2020ZX05A01)、河北省自然科学基金项目(D2024501002)和中央高校基本科研业务专项资金项目(N2423020)资助。

**第一作者:**何文渊,男,1974年10月生,2001年获北京大学博士学位,现为中国石油国际勘探开发有限公司总经理、教授级高级工程师,主要从事石油地质与勘探研究。Email: hewy@cnpcc.com.cn

**通信作者:**钟建华,男,1957年2月生,1993年获中国科学院长沙大地构造研究所博士学位,现为东北大学秦皇岛分校兼职教授,主要从事沉积学和构造地质学研究。Email: 957576033@qq.com

magmatic hydrothermal action. (5) A large number of magmatic hydrothermal alteration phenomena were found in the cores of Well Jin X in the north and Well Yingye Y in the middle of Qijia-Gulong sag, including “glass”, spherulite, hornfel, pore, almond structures. From a regional perspective, there is a magnetic anomaly, gravity anomaly and electrical anomaly zone in the deep part of Gulong sag. The seismic section reveals that there is a large area of continuous magmatic hydrothermal zone in the basement of Gulong sag, with a horst underneath. The normal faults on both sides of the horst create conditions for magmatic hydrothermal intrusion into the Qingshankou Formation shale. A dike-like intrusion was encountered during drilling the Well Jin X, and strong magmatic hydrothermal alteration was also found in the core samples. The discovery of the evidence of magmatic hydrothermal action is of great significance for studying the shale reservoir spaces and shale oil distribution in Qingshankou Formation of Gulong sag.

**Key words:** magmatic hydrothermal action; hydrothermal mineral; shale oil; Qingshankou Formation; Gulong sag

引用:何文渊,白雪峰,王瑞,钟建华,孙宁亮. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩的岩浆热液作用证据[J]. 石油学报, 2024, 45(10): 1462-1479.

Cite: HE Wenyuan, BAI Xuefeng, WANG Rui, ZHONG Jianhua, SUN Ningliang. Evidence of magmatic hydrothermal action in the shale of Qingshankou Formation of Gulong sag, Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(10): 1462-1479.

油气是一种沉积矿产,但在许多含油气盆地中会受到岩浆或岩浆热液作用影响,如塔里木盆地、渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地等<sup>[1-7]</sup>。金之钧等<sup>[1-2]</sup>发现塔里木盆地奥陶系鹰山组发育热液岩溶作用,岩浆热液作用大大改善了碳酸盐岩储层的物性;王坤等<sup>[3]</sup>发现塔里木盆地寒武系在受岩浆热液作用后,其储层物性得以大大改善;陈轩等<sup>[4]</sup>发现四川盆地中二叠统栖霞组一茅口组碳酸盐岩遭受岩浆热液作用,形成了大量马鞍状白云石及溶洞,这对改善碳酸盐岩储层的物性起到重要作用;金小燕等<sup>[5]</sup>发现渤海湾盆地的碳酸盐岩受岩浆热液作用,控制了优质储层的分布,使得盆地有机质的生烃过程提前或原油性质改性(转变为凝析油或轻质油);董月霞等<sup>[6]</sup>从岩浆及其演化过程探讨了南堡凹陷的形成动力学,认为南堡凹陷的形成演化与深部幔源岩浆的活动密切相关;王玉萍等<sup>[7]</sup>发现鄂尔多斯盆地中西部奥陶纪碳酸盐岩储层受岩浆热液活动影响。岩浆热液作用不仅带来异常高温补偿,使得有机质的生烃门限提前,而且也带来特有的高挥发性组分,使得页岩油储层发生变化,尤其是溶蚀能力很强的 F、Cl 和 Br 等元素,可深刻影响和改造页岩油储层,形成大量溶蚀孔缝。松辽盆地古龙凹陷青山口组轻质油的产出深度为 2 000~2 600 m,比一般轻质油的产出深度要浅。笔者在古龙凹陷青山口组页岩油储层中发现了大量确凿的岩浆热液作用证据,这些证据对于确定古龙凹陷青山口组轻质油的成因和分布规律以及页岩油勘探具有非常重要的科学意义。

## 1 地质背景

松辽盆地是中国重要的油气产地,其北部面积为  $11.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是一个以中生界为主的内陆断陷-拗陷叠合盆地,分为中央拗陷区、西部斜坡区、北部倾没区、东北隆起区、东南隆起区和西南隆起区 6 个一级构

造单元<sup>[8]</sup>[图 1(a)]。研究区位于松辽盆地北部一级构造单元的中央拗陷区,主体部分位于泰康隆起带和龙虎泡一大安阶地上,西部与西部斜坡区相邻,东部与齐家-古龙凹陷相邻。研究涉及的井位见图 1(b)。

松辽盆地是中生代发育的以古生代和前古生代变质岩系为基底的大型含油气沉积盆地,其发展先后经历了断陷、拗陷和构造反转 3 个演化阶段,形成了一系列伸展、挤压、反转构造<sup>[9]</sup>,构造变形的几何学、运动学特征对沉积作用产生了重要影响。嫩江组沉积末期发生构造反转<sup>[9]</sup>,松辽盆地由伸展沉降转变为挤压隆起(图 2),四方台组、明水组、依安组、大安组和泰康组形成褶皱隆起,并发育一系列深大断裂,为岩浆的侵入创造了很好的条件。

松辽盆地的基底为古生界和前古生界变质岩系、火山岩系,沉积盖层为半地槽构造层(裂谷期构造层)和拗陷构造层(裂谷期后构造层),主要包括白垩系、古近系、新近系和第四系,累计沉积厚度可达 10 km。松辽盆地在拗陷沉积期发生过 2 次大规模湖侵,在盆地中部形成大面积深湖一半深湖,发育青山口组和嫩江组 2 套烃源岩,是页岩油的主要发育层位。青山口组一段(青一段)主要为一套黑色-灰黑色泥页岩,有机质含量较高,底部有 3~4 层油页岩,是页岩油发育的主要层段(图 3)。青一段、青山口组二段(青二段)的发育面积分别为  $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;青一段暗色泥页岩的厚度为 30~100 m,青二段暗色泥页岩的厚度为 60~240 m,这为古龙页岩油的形成奠定了良好的物质基础<sup>[10]</sup>。

大庆油田古龙凹陷的“泥岩油”发现颇早,高瑞祺<sup>[11]</sup>报道了古龙凹陷的竖直裂缝型泥岩油藏,是古龙凹陷页岩油发现的前奏。近几年,松页岩油 AHF 井和松页岩油 BHF 井等井在页岩油钻探上取得了突破,尤其是古页岩油平 C 井,其钻探成果具有重大战略转折意

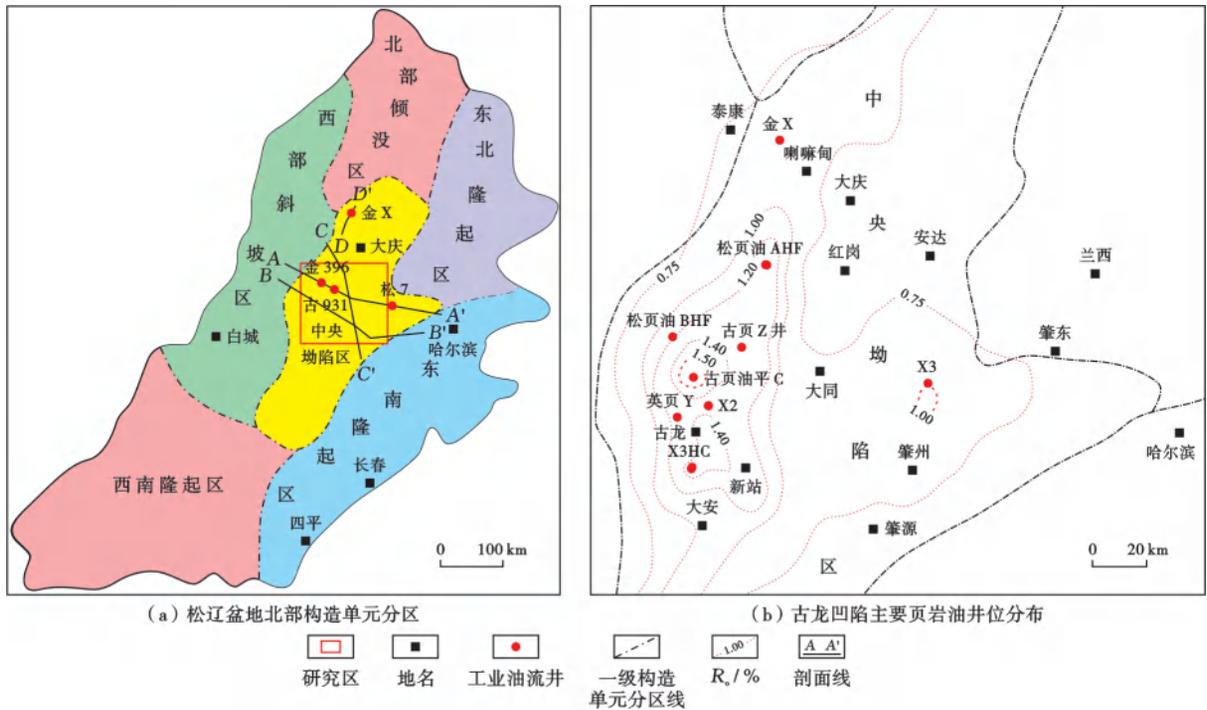


图1 松辽盆地北部构造分区及古龙凹陷主要页岩油井位置(据文献[8]修改)

Fig. 1 Tectonic division of the northern Songliao Basin and location of main shale oil wells of Gulong sag

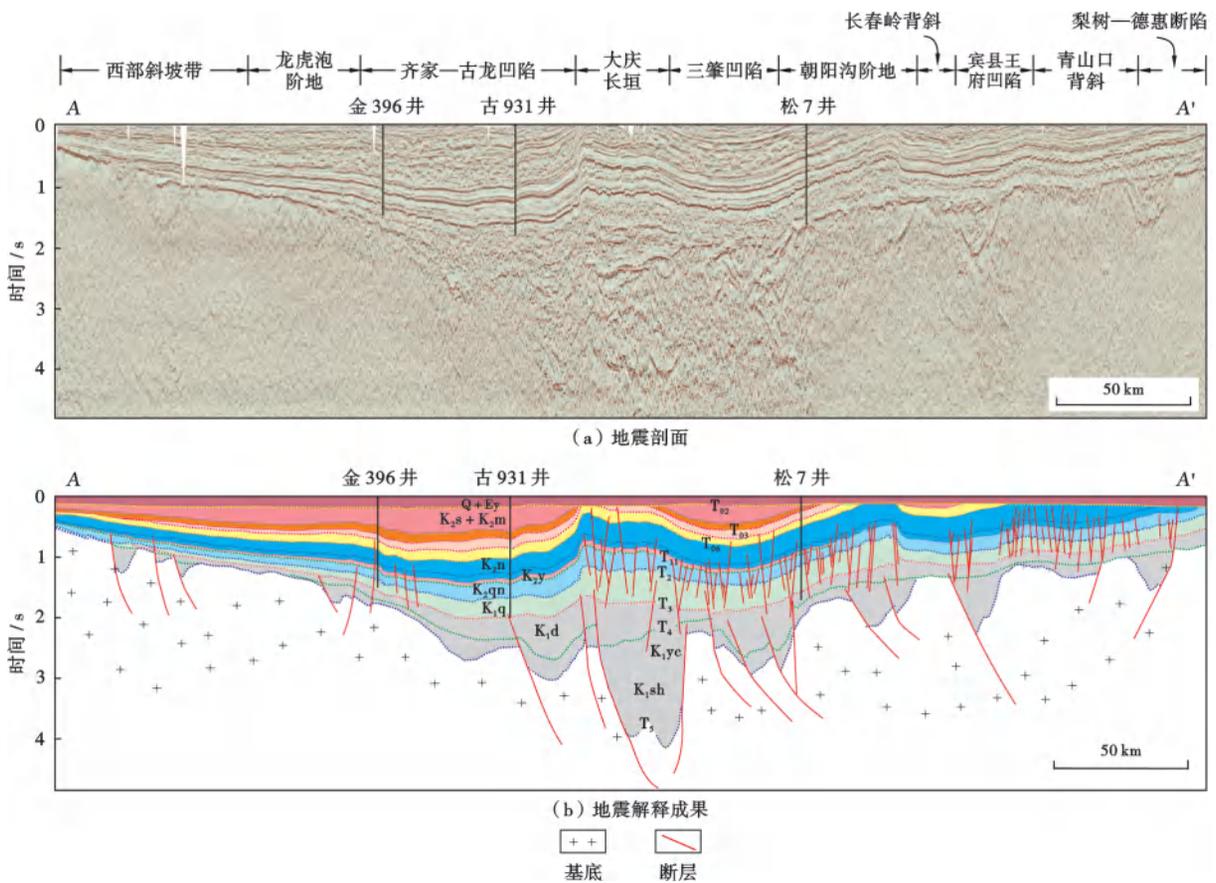
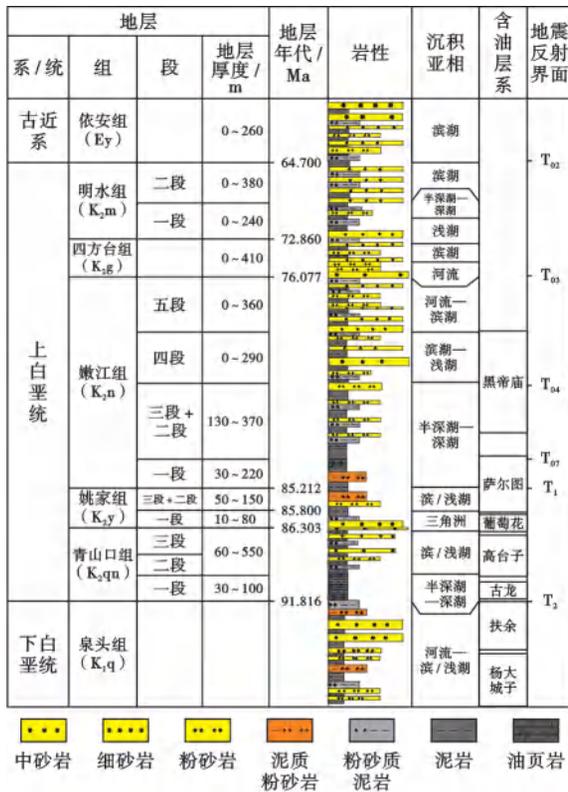


图2 松辽盆地过古龙凹陷的EW向地震剖面及其解释成果(据文献[8]修改,剖面位置见图1)

Fig. 2 The east-west trending seismic section and its interpretation results crossing Gulong sag in Songliao Basin



注: T<sub>02</sub>—依安组底界; T<sub>03</sub>—四方台子组底界; T<sub>04</sub>—嫩四段底界; T<sub>07</sub>—嫩二段底界; T<sub>1</sub>—嫩江组底界; T<sub>2</sub>—青山口组底界。

图 3 古龙凹陷综合地层特征(据文献[8]修改)

Fig. 3 Comprehensive stratigraphic characteristics of Gulung sag

义<sup>[12]</sup>。松辽盆地在纵向上多层位含页岩油,资源丰富,油藏类型多样,但目前对页岩油油藏类型、分布规律及成藏主控因素的认识还不够清楚。研究起步较晚、资料较少、基础研究较薄弱、未知性较多,这些问题给页岩油的勘探开发带来了巨大的困难。

松辽盆地青山口组发育丰富的页岩油,总资源量可达  $151 \times 10^8$  t,是大庆油田重要的接替资源。青山口组页岩油的源储比大于 90%,单砂体厚度小于 0.20 m,属于典型的纯页岩型(Ⅲ型)页岩油<sup>[13]</sup>。何文渊等<sup>[14-15]</sup>基于古龙凹陷生烃物质的研究提出了原位成藏理论,并认为青山口组页岩储层中存在大量游离态油;青山口组页岩储层除含有纳米孔缝以外,还发育大量微米孔缝,有机质中发育的大量微米孔是轻质油的有利储集空间<sup>[8,16]</sup>;此外,青山口组页岩油富含氮,其含量可达 10%~20%,远高于中国和世界其他地区的原油,而氮的富集程度主要与硅藻生烃有关<sup>[17]</sup>。综合分析认为,古龙凹陷青山口组发育陆相湖盆页岩,其分布面积广,烃源岩品质好,具备良好的页岩油资源基础和动用潜力<sup>[18]</sup>。

古龙凹陷青山口组的轻质原油主要发育在一套镜

质体反射率( $R_o$ )为 1.3%~1.6%的高成熟度页岩中,具有饱和烃含量高、含蜡量高、密度低、芳香烃含量低、沥青质含量低的“两高三低”特征,以层状页岩、纹层状页岩的含油性最好,成藏上具有高地温梯度、高成熟度、高压系数、高气油比的“四高”特点<sup>[19]</sup>。然而,青山口组轻质油发育的深度为 2000~2600 m,分布面积达 2750 km<sup>2</sup>,按照正常的地温条件,这一深度范围内不可能发育轻质油,因此青山口组轻质油的形成及成藏规律令人不解。近期的研究认为,古龙页岩油储层中存在明显的岩浆热液作用,可对青山口组页岩进行深刻的地热改造,促使古龙凹陷青山口组页岩在较浅的深度范围内达到受迫性过成熟条件<sup>[20]</sup>,从而形成轻质油。笔者将对这一岩浆热液作用展开讨论。

## 2 古龙页岩的特点

何文渊<sup>[21-22]</sup>对古龙凹陷青山口组页岩的黏土矿物组及其孔隙开展了研究,发现伊利石等黏土矿物会形成面对面(face to face)、面对边(face to edge)和边对边(edge to edge)3种基本的晶间纳米孔,并阐明了这些结构和孔隙与原位成藏的重要关系。页岩的结构不仅能够反映其成因,而且还影响着页岩的含油性和开发价值<sup>[23-24]</sup>。古龙凹陷页岩油储层中的纳米—微米孔主要发育在绿泥石等自生矿物中,绿泥石具有独特的结构特点(分布凌乱,不受页理控制),与其他黏土矿物的结构大相径庭。

### 2.1 宏观岩石学特点

松辽盆地青山口组为一套岩性以页岩为主的细粒碎屑岩,其体积占比达 95%<sup>[12]</sup>。除页岩外,青山口组还包含泥岩、灰色—浅灰色薄层细砂岩和粉砂岩、介形虫灰岩及黄褐色白云岩或白云石化页岩。页理是青山口组页岩最重要的沉积构造。页理是水平层理的一种,具有特殊的颗粒成分、粒度、颜色和定向排列等,岩石沿页理面较容易剥开。但对于松辽盆地青山口组页岩储层,较容易剥开的面不是沉积形成的页理面,而是构造顺层滑动形成的页理缝<sup>[10]</sup>。

### 2.2 微米—纳米显微岩石学特点

扫描电镜分析表明,古龙凹陷青山口组页岩的黏土矿物中发育大量直径较大的微米—纳米缝,呈连续分布。微米—纳米缝的宽度( $D$ )为数十纳米到数微米,可以分为 2 种:一种是缝宽为 10~50 nm 的网状纳米缝;另一种是缝宽在 50 nm 到数百纳米的顺层或顺页理纳米缝。二者在空间上交织成网络。不同级别孔缝的图像分析结果显示:在局部黏土矿物富集且孔隙最为发育的区域,总孔隙度(包括所有的纳米缝)可达 30.64%<sup>[8]</sup>;在不包含缝宽在 50 nm 以上的区域,孔隙

度(包括所有的纳米缝)达6.91%;在 $50\text{ nm} \leq D \leq 100\text{ nm}$ 的区域,孔隙度仅为5.65%;在 $100\text{ nm} < D \leq 200\text{ nm}$ 的区域,孔隙度达8.39%;在 $D > 200\text{ nm}$ 的区域,孔隙度为8.94%。后4种不同级别孔缝区域的孔隙度之和为29.84%,比总孔隙度(30.64%)略小。

图像分析获得的孔隙度包括固体沥青充填孔隙的孔隙度<sup>[8]</sup>。与利用其他方法测得的孔隙度不同,图像分析获得的孔隙度是其他方法测得孔隙度的3~4倍。笔者认为,通过图像分析获得的孔隙度是地下覆压条件下的真实孔隙度,揭示了页岩在地下具备较好的物性。

### 3 古龙页岩中岩浆热液作用的证据

松辽盆地自沙河子组沉积期开始到嫩江组沉积期均有持续不断的火山作用。青山口组含有3~5层凝灰岩,嫩江组含有20多层凝灰岩,这证明松辽盆地在2个主力页岩油层形成期均遭受了火山作用。近期在古页Z井等井的岩心中发现了与岩浆热液作用有关的证据。

#### 3.1 岩浆热液矿物组合

##### 3.1.1 黄铜矿( $\text{CuFeS}_2$ )和自然铜

古龙凹陷青山口组页岩油储层中发现黄铜矿[图4(a)—图4(d)]和自然铜[图4(e)、图4(f)],其产出状态与周缘呈港湾状无缝接触,而非碎屑接触。通过能谱分析确定其化学组成分别为 $\text{CuFeS}_2$ 和Cu。黄铜矿的成因有岩浆作用、接触交代作用和成矿热液作用<sup>[25]</sup>。黄铜矿在不同温度下形成的晶系不同,在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 以上为等轴晶系,在 $550\sim 213\text{ }^\circ\text{C}$ 为四方晶系,在 $312\text{ }^\circ\text{C}$ 以下为斜方晶系的变体。无论哪种晶型,黄铜矿的形成温度均需要达到 $312\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。Barton等<sup>[26]</sup>认为黄铜矿的形成温度区间应为 $200\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ 。有关黄铜矿晶系的模拟实验均在 $500\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温条件下进行<sup>[27]</sup>。这证明岩浆热液影响了古龙页岩,因此,有理由推测古龙凹陷轻质油的形成与页岩遭受热液作用有关。古龙页岩中的黄铜矿应为岩浆向上侵入时在深部结晶形成,后被岩浆热液带到古龙页岩中,而非在页岩油储层中形成。简言之,黄铜矿是被热液流体从深部搬运到页岩中来的。因此,不能把黄铜矿的形成温度作为侵入页岩的热液流体的温度。除黄铜矿外,页岩油储层中还发现自然铜[图4(e)、图4(f)],自然铜的成因除与黄铜矿等硫化矿物氧化有关外,也与岩浆热液作用有关。

##### 3.1.2 闪锌矿和硫化锌矿

能谱分析表明,古龙页岩中发育闪锌矿( $\text{ZnS}$ ) [图5(a)、图5(b)],其形态呈孤立颗粒状[图5(a)],直径在数微米,形

状不定,边缘较平整,与其他矿物呈无缝衔接[图5(a)],局部有挤入现象[图5(a)]。能谱分析还发现一种 $\text{ZnS}_2$ 化合物,这种新的硫化矿物可能含有其他的硫化物或单质硫[图5(c)、图5(d)],如少量的 $\text{MoS}_2$ ,可能是硫化锌和硫化钼的混合。Cook等<sup>[28]</sup>发现闪锌矿脉的形成温度在 $260\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ ,Martín等<sup>[29]</sup>在1 GPa压力下从 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 完成了闪锌矿模拟实验,这些均表明闪锌矿形成于高温条件下。有必要指出的是,闪锌矿可能与黄铜矿一样,是在深部形成后被岩浆热液流体带到古龙凹陷青山口组页岩中,而不是在页岩中结晶析出,因此,矿物的析出温度并不代表页岩所经历的温度。闪锌矿中伴生辉钼矿也指示存在热液作用成因<sup>[30]</sup>。

##### 3.1.3 硫化银(辉银矿)

发现化学组成为 $\text{Ag}_2\text{S}_3$ 的矿物[图6(a)、图6(b)]。与辉银矿( $\text{Ag}_2\text{S}$ )不同, $\text{Ag}_2\text{S}_3$ 的元素组成比辉银矿多了2个S原子,但其成因和形成条件应该与辉银矿相同,同样为一种热液作用矿物。辉银矿在温度为 $179\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[31]</sup>以上才稳定,初步推测 $\text{Ag}_2\text{S}_3$ 的形成温度也在 $179\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

##### 3.1.4 重晶石( $\text{BaSO}_4$ )

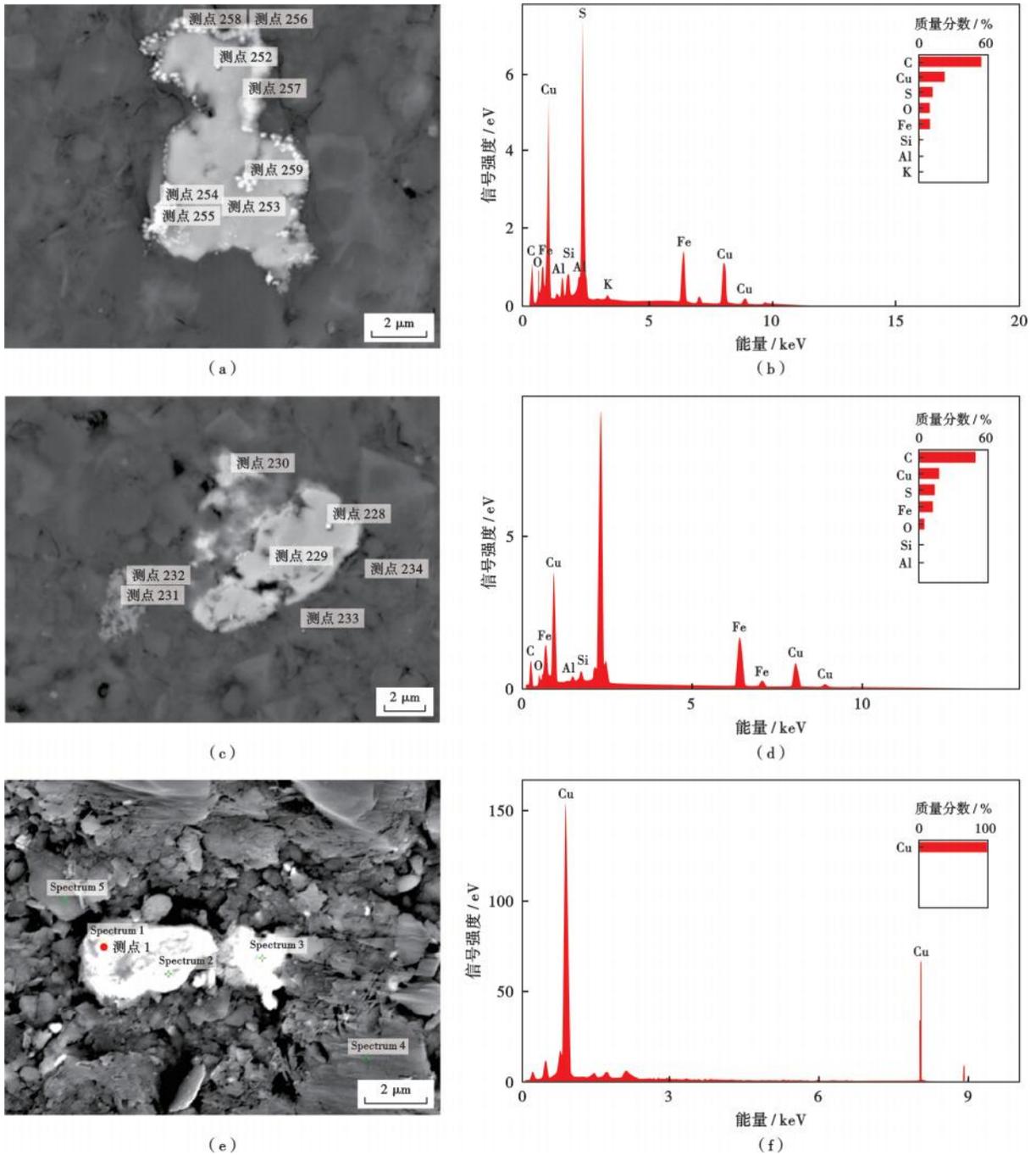
电镜和能谱分析表明[图6(c)、图6(d)],古龙凹陷页岩油储层中发育重晶石。重晶石在背散射图像中呈灰白色他形颗粒状,粒径为 $15\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ ;与周围的石英和白云石呈无缝衔接,与溶蚀孔共生。重晶石从产出状态看不是碎屑成因,而是在成岩过程中形成。突尼斯北部Ain Allega矿床中天青石内的流体包裹体分析表明, $\text{BaSO}_4\text{-SrSO}_4$ 固溶体来自热盐水[其流体包裹体的均一温度为 $(190 \pm 20)\text{ }^\circ\text{C}$ ],其沉积可能是盆地卤水与岩浆-大气流体混合的结果<sup>[32]</sup>。Kusakabe等<sup>[33]</sup>的硫同位素分馏研究发现,含 $\text{BaSO}_4$ 的成矿流体温度可达 $350\text{ }^\circ\text{C}$ ,而包裹体测温获得的成矿温度为 $310\sim 390\text{ }^\circ\text{C}$ ,两者基本接近,表明重晶石的形成温度约在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,重晶石形成于温度较高的热液流体中。

##### 3.1.5 氟磷灰石

电镜观察发现古龙页岩中含有大量像黄铁矿一样的矿物[图7(a)],能谱分析发现其化学成分为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,C,OH})$ ,接近氟磷灰石[图7(b)—图7(e)]。Lupulescu等<sup>[34]</sup>和Apukhtina等<sup>[35]</sup>认为氟磷灰石为岩浆热液成因。磷灰石一般为一种副矿物,在古火山岩、变质岩、沉积岩和热液岩中几乎无处不在,甚至在陨石中<sup>[33]</sup>。古龙页岩中的氟磷灰石往往与有机质和黄铁矿共生,多产在裂缝中,从其产出方式来看,应属于热液蚀变成因。氟磷灰石的晶形一般很好,棱角完整<sup>[33]</sup>[图7(a)、图7(c)、图7(d)],表明其未经过搬运,并

非沉积形成,多与有机质共生[图 7(a)、图 7(e)]。包裹体中检测出的氟磷灰石可作为岩浆、热液或变质流体的标志<sup>[36]</sup>。确定氟磷灰石的成因主要看矿物组合。古龙页岩中的氟磷灰石均与热液金属硫化矿物(黄铜

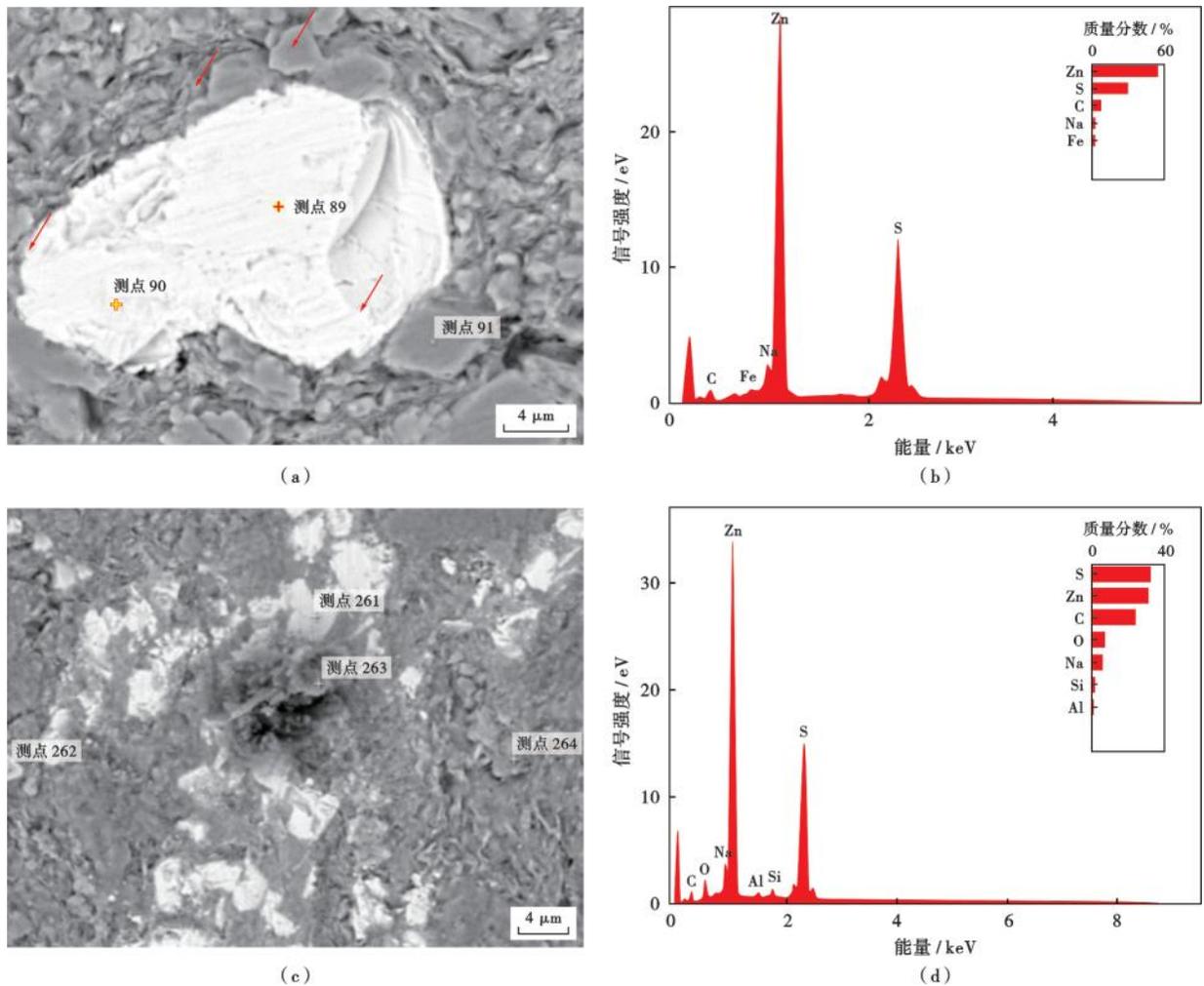
矿、闪锌矿及黄铁矿等)一起产出,所以其主要为热液成因。有一种特殊的含氟磷灰石的沥青[图 7(e)]充填在硕大的裂缝和孔隙中,含有来自地下深部(地核)的稀有元素铌[图 7(f)]。



(a)黄铜矿背散射图像,可见边缘有更明亮的反应边,可能为含 Cu 更高的矿物;(b)图(a)中测点 252 的能谱特征,可见除了 C 和 O 元素外,Cu、Fe 和 S 元素含量也较高,可能有部分菱铁矿,其次为黄铜矿;(c)破碎颗粒状黄铜矿背散射图像,与周边矿物无缝隙接触,发育港湾边界;(d)图(c)中测点 230 的能谱特征,除黄铜矿外,还含有大量 C、O、Al 和 Si 元素,为一种混有有机质的黄铜矿;(e)自然铜的背散射图像,亮白色,自然铜与黏土矿物呈港湾状无缝隙接触,揭示其不是碎屑铜颗粒,而是成岩过程中的自生铜;(f)图(e)中测点 1 的能谱特征,完全为 Cu 元素。

图 4 黄铜矿背散射图像及其能谱特征

Fig. 4 Back scattered images and energy spectrum characteristics of chalcopyrite



(a) 闪锌矿的背散射图像, 可见闪锌矿颗粒有周缘的矿物呈嵌入结构(红色箭头), 在闪锌矿与周缘的矿物之间没有缝隙和孔隙, 揭示闪锌矿是后期在成岩过程中形成的, 而不是碎屑成因; (b) 测点 89 的能谱特征, 可见 S 和 Zn 是主要元素, 恢复其化学组成为 ZnS(闪锌矿), 含有 Ni 和 Fe 等杂质; (c) 形态不规则颗粒状闪锌矿的背散射图像; (d) 测点 261 的能谱特征, 主要是一种闪锌矿, 可能还含有另一种热液成因的辉钼矿。

图 5 闪锌矿背散射图像及其能谱特征

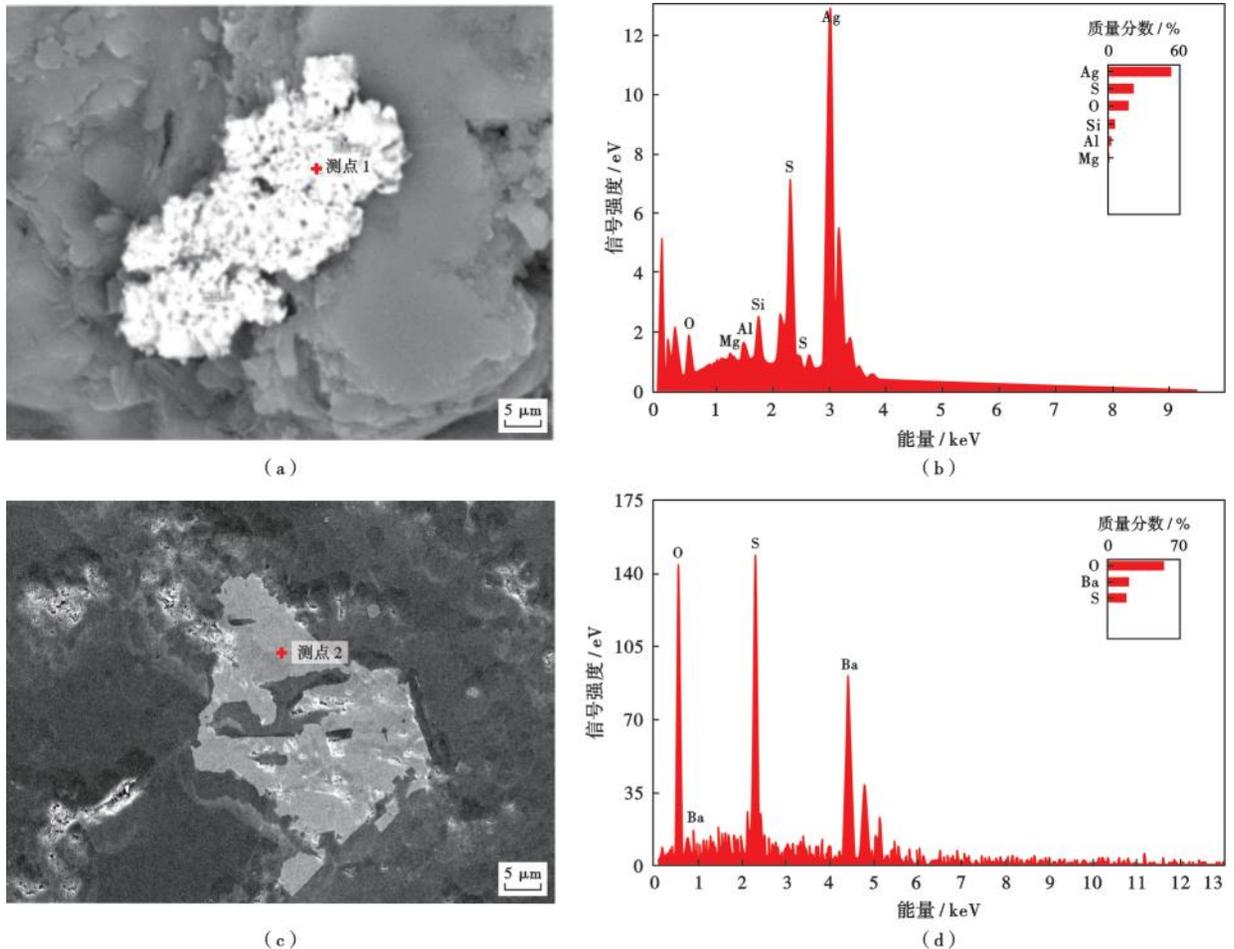
Fig. 5 Back scattered images and energy spectrum characteristics of sphalerite

图 9(a)和图 9(c)中存在大量自生的具有“雾心白边”的白云石, 与氧化钛矿物无缝镶嵌接触, 表明二者是同时形成, 且共用同样的结晶空间。图 9(c)中的白云石具有自形或半自形结构, 表明其结晶空间比较充分, 可能揭示岩浆热液作用很强烈。

古龙页岩中的岩浆热液矿物类型很多, 也很复杂, 除了上述岩浆热液矿物外, 还有锑矿和菱铁矿等。笔者对古页 Z 井的岩心进行了精细观察描述和密集采样, 每隔 0.5 m 采集 1 个样品, 共采集了 276 个样品。对这些样品进行场发射扫描电镜和能谱分析, 绝大部分样品都能见到岩浆热液矿物和高温岩浆热液元素。高温岩浆热液元素不是在碎屑矿物中检测到, 而是在岩心样品渗出的原油中检测到。铋、钼、钨和汞是壳幔循环元素, 其在古龙页岩 Z 井的岩心渗出重质油或沥

青中经常出现。结合其他岩浆热液矿物分析, 有理由认为其为高温岩浆热液元素, 且推测古龙页岩的岩浆热液可能来自于深部, 甚至幔源(Cr、Co 和 Ni 元素也有异常)。从图 10 可以看出, 在古页 Z 井, 从上到下岩浆热液矿物和岩浆热液元素的分布无明显规律, 但总的来说以高一中温硫化矿物和高温热液元素为主。这些高一中温硫化矿物和高温热液元素部分可能来自于岩浆热液侵入过程, 而不是在页岩储层中形成, 因此其形成温度不代表岩浆热液就位温度。总之, 在古龙页岩油储层中, 由一系列热液形成的以硫化矿物和高温岩浆热液元素为主的金属组分充分揭示了古龙凹陷青山口组页岩油储层受过岩浆热液作用。

除了上述热液型矿物外, 古龙页岩中还含有白云石、石英和钠长石等岩浆热液矿物。



(a)硫化银(辉银矿)矿物的背散射图像;(b)测点 1 的能谱特征,  $\text{Ag}_2\text{S}_3$  为热液成因,在 179 °C 以上才稳定;(c)重晶石矿物背散射图像;(d)测点 2 的能谱特征。

图 6 硫化银(辉银矿)和重晶石背散射图像及其能谱特征

Fig. 6 Back scattered images and energy spectrum characteristics of silver sulfide (argente) and barite

### 3.1.6 Fe-Cr-Ni-Ti 和 Ni-Fe-Mo 合金

古龙页岩中常见 Fe-Cr-Ni-Ti [图 8(a)、图 8(b)] 和 Ni-Fe-Mo 合金 [图 8(c)、图 8(d)], 这种组合与岩浆热液成因有关<sup>[37]</sup>。图 8(a)中的 Fe-Cr-Ni-Ti 合金呈颗粒状, 其长、宽分别为 35  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$ , 而周围长英质碎屑矿物的直径多为 3~5  $\mu\text{m}$ , 密度不及前者的一半 (Fe 的密度为 5.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、Cr 的密度为 7.20  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、Ni 的密度为 8.90  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、Ti 的密度为 4.51  $\text{g}/\text{cm}^3$ )。沉积分异作用很难形成 Fe-Cr-Ni-Ti 和 Ni-Fe-Mo 合金。一般来说, 重矿物的粒度会小于长英质颗粒的粒度, 对超重的 Cr 矿和 Ni 矿来说更是如此。在图 8(c)中, Ni-Fe-Mo 合金呈球粒结构, 球粒表面光滑, 没有任何擦痕。自生的 Co 矿和 Ni 矿是 2 种超基性矿物, 所以有理由推测其为岩浆热液成因, 而不是碎屑矿物。

### 3.1.7 金红石、白钛石、白榴石、榴石

能谱分析表明, 古龙页岩中含有氧化钛矿物, 其在场发射扫描电镜下呈梳状 [图 9(a)、图 9(b)]。氧化钛

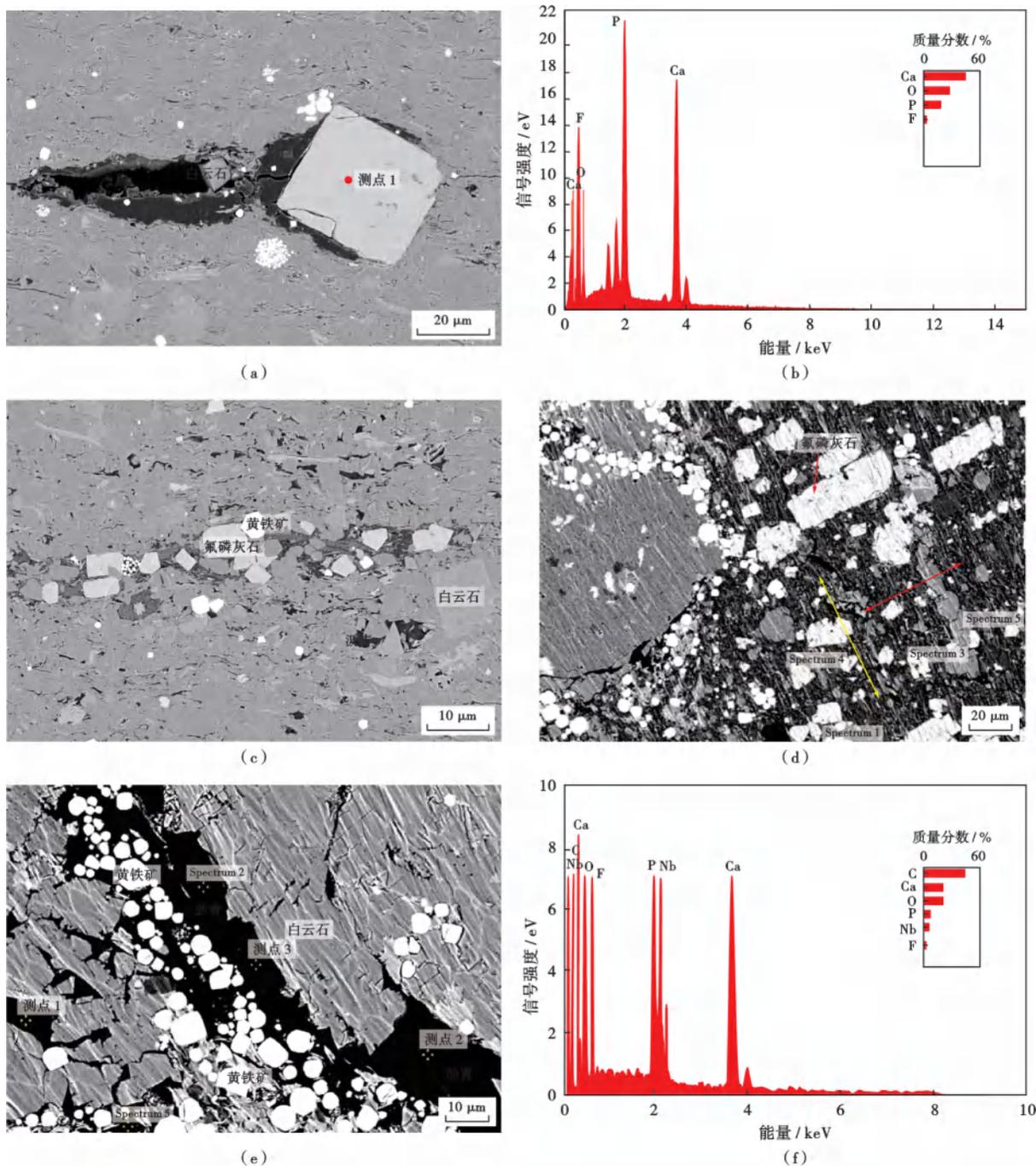
矿物主要为金红石、白钛石、白榴石和榴石。前人的研究认为, 在阿尔卑斯山的 Alpe Arami 地体中,  $\text{TiO}_2$  是从 300 km 深处浮出, 对应的压力达 10 GPa<sup>[38]</sup>。氧化钛矿物边缘的白云石和石英等均为他形且没有清晰的边界, 这表明氧化钛矿物为非碎屑成因, 是岩浆热液作用的产物。岩浆热液的温度达 310~576 °C<sup>[38]</sup>, 这种高温只是反映了氧化钛矿物的形成温度很高, 很可能是岩浆上侵入时的温度, 并不能代表侵入页岩层后的温度。细针状氧化钛矿物(金红石) [图 9(c)、图 9(d)] 的形成温度稍低, 为 150~450 °C<sup>[39]</sup>。总之, 氧化钛矿物形成于高温岩浆热液条件。图 9(e)中的氧化钛矿物呈不规则筛网状, 能谱分析揭示其成分为一种四氧化钛 [图 9(f)], 但是否为  $\text{H}_4\text{TiO}_4$ , 需进一步研究。

### 3.2 碳-氧同位素分析

对古龙凹陷青山口组的碳酸盐岩进行的碳、氧同位素分析表明, 古龙凹陷青山口组方解石具岩浆热液成因 (图 11)。碳-氧同位素常常被用来判别(储层)岩

浆热液作用的影响。对青山口组白云岩/灰岩薄层和结核进行碳-氧同位素分析,碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )的分布区间为0.15‰~16.13‰,平均为7.18‰;氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )的分布区间为-17.10‰~-6.70‰,平均为-11.09‰。

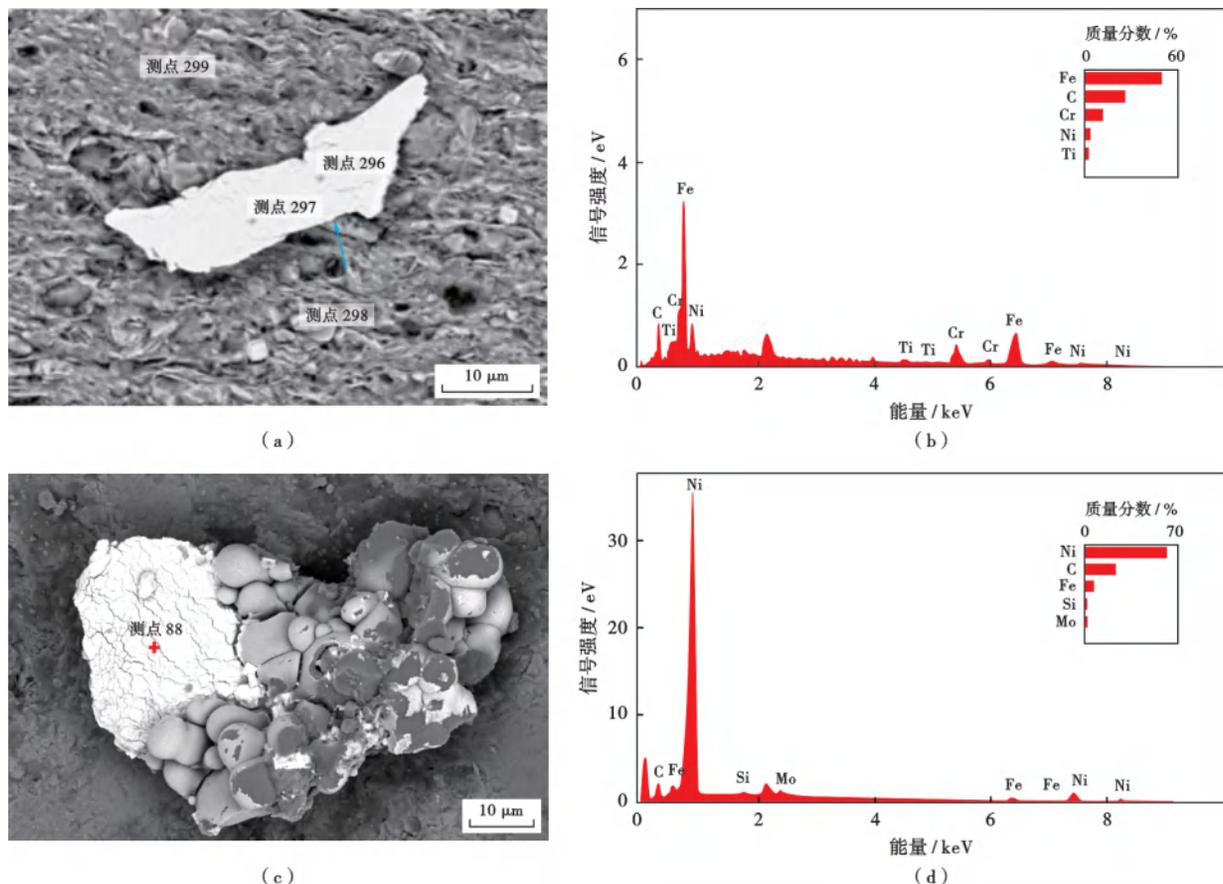
在塔里木盆地受岩浆热液作用的储层中,方解石脉的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布区间为-15.38‰~-8.04‰,与古龙凹陷青山口组的 $\delta^{18}\text{O}$ 非常接近。渤海湾盆地受热液改造的方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏低,小于-10.00‰,而未受热



(a)氟磷灰石、白云石等矿物的背散射图像,磷灰石呈四边形,三边被沥青包裹,其左侧还有一大团沥青和有机孔,其中有一个晶形很好的白云石,周围的亮点为黄铁矿;(b)图(a)中测点1的能谱特征,为一种典型的氟磷灰石;(c)成行发育的氟磷灰石,晶形很好,此外还有黄铁矿、白云石,在微孔中还有沥青;(d)成群分布的氟磷灰石,长轴垂直页理优势分布;(e)含氟磷灰石的沥青,充填在自生白云石的微米缝和微米孔中,有大量的自生白云石和自生黄铁矿;(f)图(e)中测点2的能谱特征,除含有大量的C以外,还有较多的O、Ca、P和F元素,经计算为一种氟磷灰石,含有热液成因的铌。

图7 氟磷灰石背散射图像及其能谱特征

Fig. 7 Back scattered images and energy spectrum characteristics of fluorapatite



(a)背散射图像,蓝色箭头指示黏土片插入 Fe-Cr-Ni-Ti 合金矿物中;(b)测点 296 中 Fe-Cr-Ni-Ti 合金的能谱特征,以 Fe 为主,有一些 Cr,还有少量 Ni 及微量 Ti,C 可能是抛光时的污染;(c)与硅质球粒一起产生的 Ni-Fe-Mo 合金;(d)测点 88 中复杂的 Ni-Fe-Mo 合金的能谱特征,Ni 较高,缺乏 Ti。

图 8 Fe-Cr-Ni-Ti 和 Ni-Fe-Mo 合金背散射图像及其能谱特征

Fig. 8 Back scattered images and energy spectrum characteristics of Fe-Cr-Ni-Ti and Ni-Fe-Mo alloys

液改造的方解石的  $\delta^{18}\text{O}$  大于  $-10.00\%$ <sup>[17]</sup>,这也与古龙凹陷青山口组的  $\delta^{18}\text{O}$  近。 $\delta^{18}\text{O}$  的变化主要受介质性质和温度控制,因地下深处热液流体的侵入而导致地层温度有所升高,热力分馏作用增强,进而导致受热液改造的方解石的  $\delta^{18}\text{O}$  偏低<sup>[16]</sup>。从图 11 可以看出,碳-氧同位素数据均落在了岩浆热液区,这从另一个侧面证明青山口组受岩浆热液作用影响。

古龙页岩油储层的白云石化作用很明显,一些白云岩薄层和结核都是白云石化作用的结果。白云石化作用是古龙页岩油储层中 5 种热液作用(白云石化作用、绿泥石化作用、黄铁矿化作用、硅化作用和斜长石化作用)之一,深刻地影响和改造了古龙凹陷青山口组页岩油储层。

### 3.3 流体包裹体均一温度

对古龙凹陷青山口组方解石脉进行了包裹体测温(图 12),盐水包裹体的均一温度为  $101.8 \sim 166.8\text{ }^\circ\text{C}$ [图 12(a)],绝大部分分布在  $130.0 \sim 166.8\text{ }^\circ\text{C}$  而油气包裹体的均一温度一般在  $110\text{ }^\circ\text{C}$  以下[图 12(b)]。

两类包裹体的均一温度均偏高,这种异常主要来自于岩浆热液作用。由于叠加异常温度,古龙页岩形成了轻质油,否则,在  $2000 \sim 2500\text{ m}$  埋深段是难以形成轻质油的。前人对青山口组方解石脉进行测年的结果显示其地质年龄约在  $70\text{ Ma}$ <sup>[40]</sup>,相当于古近纪明水组沉积期,因此推断轻质油的成藏期在明水组沉积期。

### 3.4 稀土元素分析

对古页 Z 井的 45 个岩心样品进行了稀土元素分析。从图 13 的分析结果可以看出,古页 Z 井大部分样品的稀土都落在花岗岩区,表明稀土元素具有来自花岗岩区的特点。造成这一现象的原因可能是由于古龙页岩受到了花岗岩质热液流体的作用。样品在扫描电镜下可看到强烈硅化、钠长石和钾长石化现象。

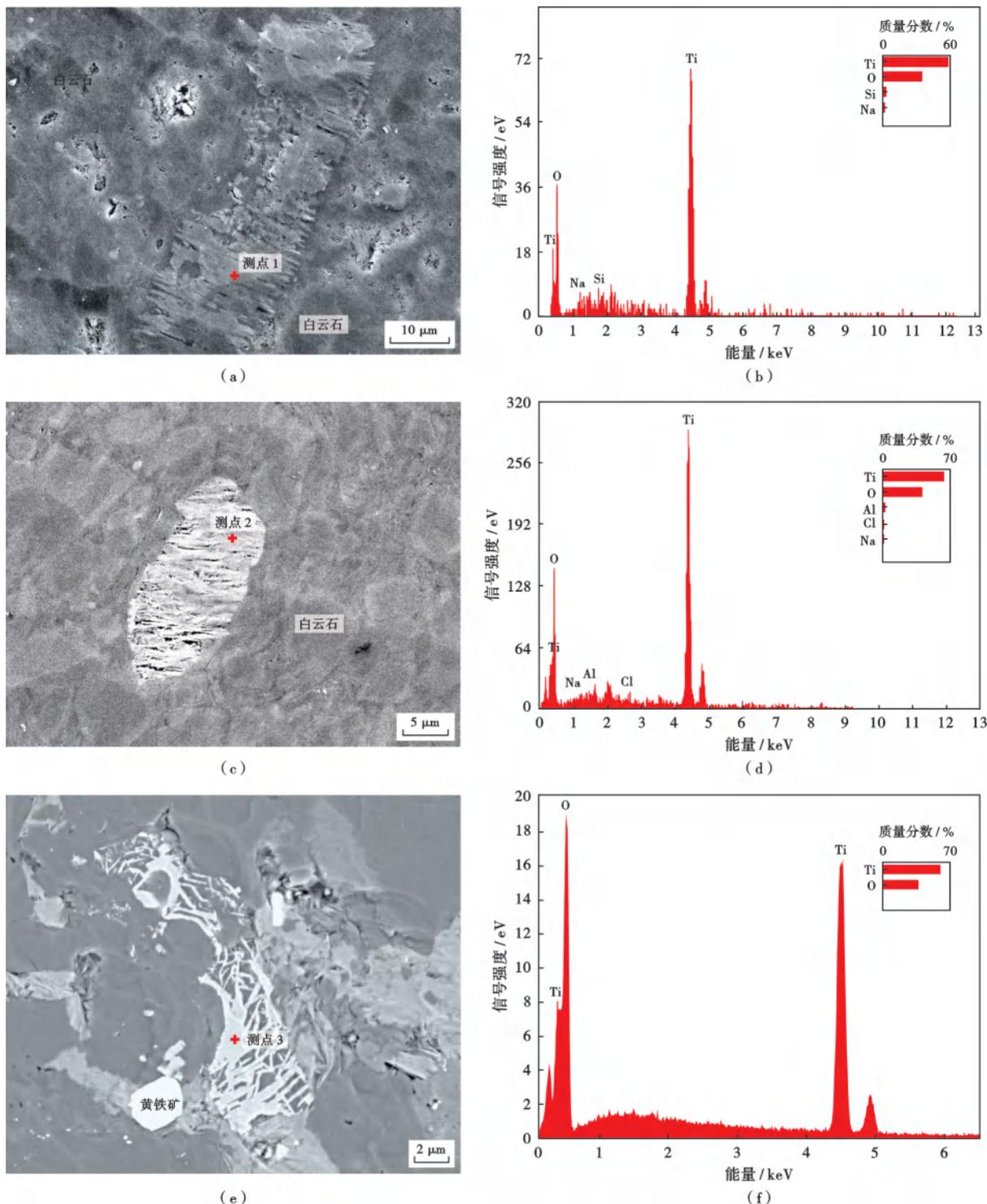
### 3.5 岩心上的岩浆热液作用证据

笔者通过对来自齐家—古龙凹陷北端金 X 井青山口组的岩心进行了仔细观察,发现了大量岩浆侵入和热液作用证据(图 14):①角岩化强烈,球粒构造发育[图 14(a)];②气孔和杏仁构造发育[图 14(b)]—

图 14(e)],直径多在数十微米到 200~300 μm,圆形、次圆形或不规则形态;③碳酸岩脉发育[图 14(a)、图 14(e)],分隔了球粒或砾屑;④蚀变重结晶强烈,蚀

变圈环发育[图 14(b)、图 14(e)].

除金 X 井岩心有岩浆热液直接作用的现象外,英页 Y 井的岩心也可见岩浆热液作用(图 15),其现象与



(a)氧化钛矿物和白云石,氧化钛矿物呈梳状,产于自生白云石之间,无缝隙接触,表明氧化钛矿物为自生,扫描电镜;(b)图(a)中测点 1 氧化钛矿物的能谱特征;(c)金红石呈梳状、交织状,亮色,周围为自生白云石,具有“雾心白边”结构,扫描电镜;(d)图(c)中测点 2 金红石的能谱特征;(e)氧化钛矿物和黄铁矿,其中,氧化钛矿物呈不规则网格状,产于自生白云石和石英中,明显为自生,扫描电镜;(f)图(e)中测点 3 的能谱特征,主要组分为氧(64.55%)和钛(35.45%),可能是一种  $H_4TiO_4$ 。

图 9 氧化钛矿物背散射图像及其能谱特征

Fig. 9 Back scattered images and energy spectrum characteristics of titanium oxide minerals

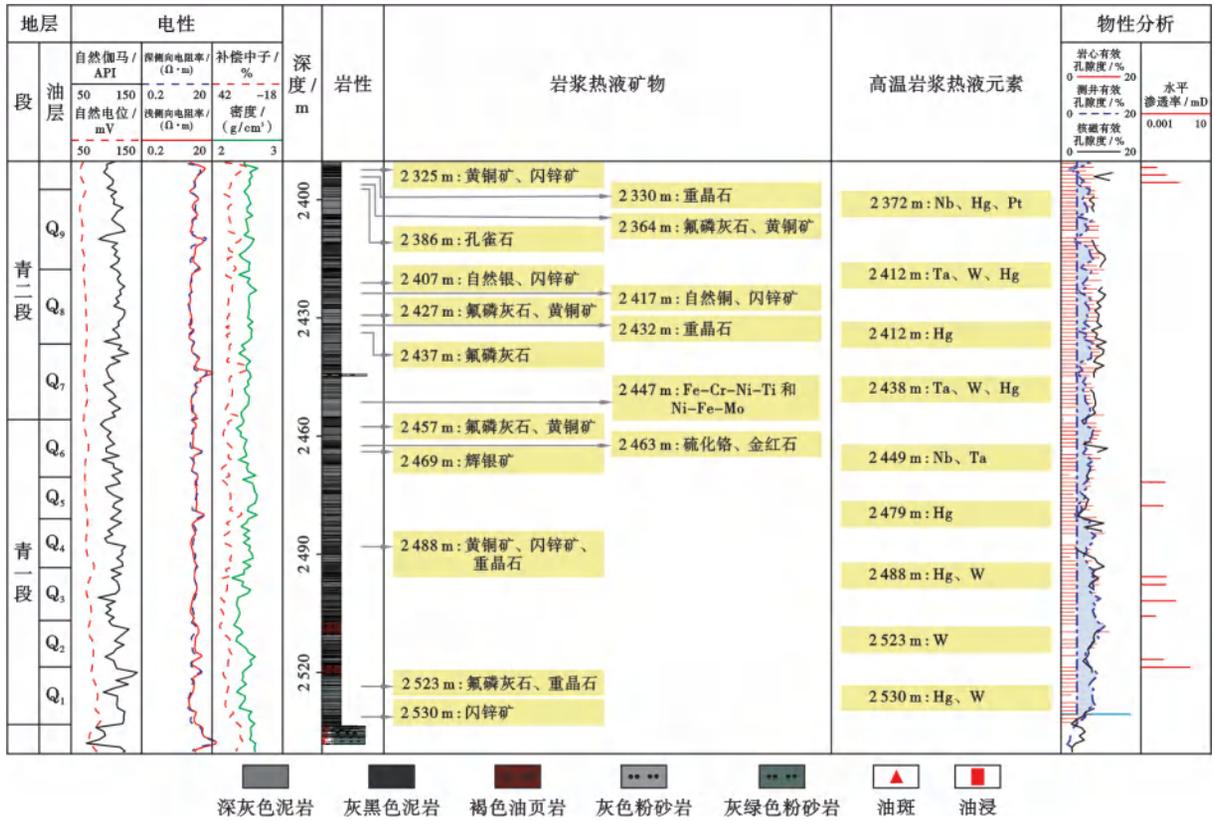


图 10 古页 Z 井的岩性、电性、物性、含油性以及岩浆热液矿物和高温岩浆热液元素分布

Fig. 10 Lithology, electricity, physical and oil-bearing properties, and distribution of magmatic hydrothermal minerals and high temperature magmatic hydrothermal elements in Well Guye Z

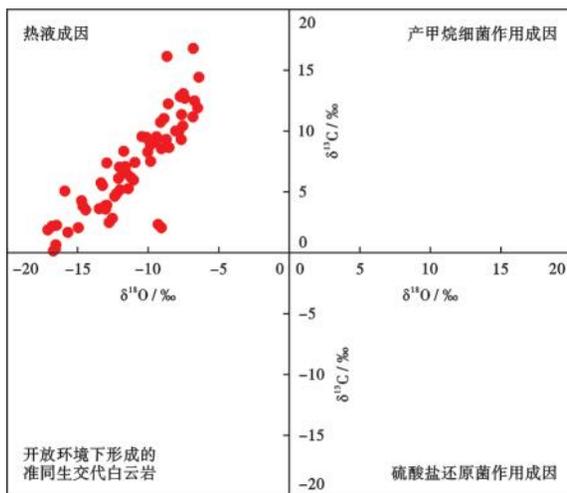


图 11 古龙凹陷青山口组方解石的碳-氧同位素分析  
Fig. 11 Carbon and oxygen isotope analysis of calcites in Qingshankou Formation of Gulong sag

金 X 井完全不同,形成了黑色“玻璃”、气孔、杏仁构造[图 15(a)—图 15(d)]、泡沫构造[图 15(e)、图 15(f)]和独特的定向排列组构[图 15(g)、图 15(h)]。黑色“玻璃”在显微镜下实际上为一种由定向排列的黏土矿物和高度变质的有机质组成的特殊结构,与原先的页

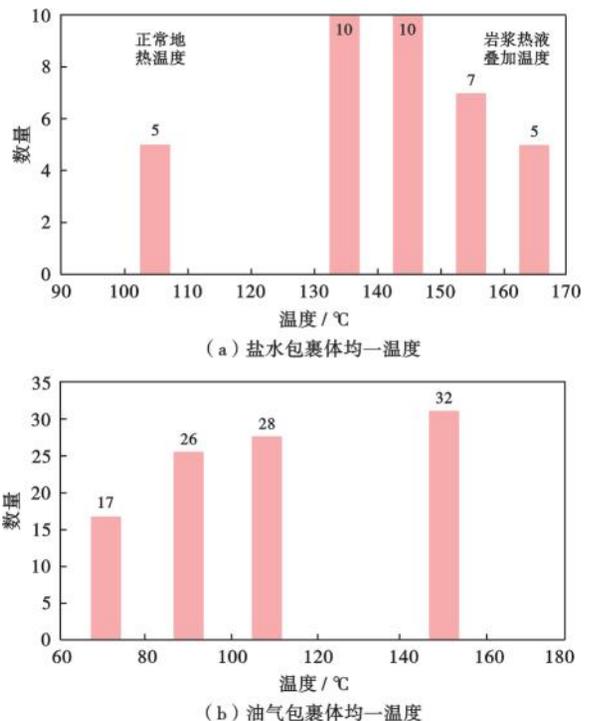


图 12 古龙凹陷青山口组包裹体均一温度分布  
Fig. 12 Homogeneous temperature distribution of inclusion in Qingshankou Formation of Gulong sag

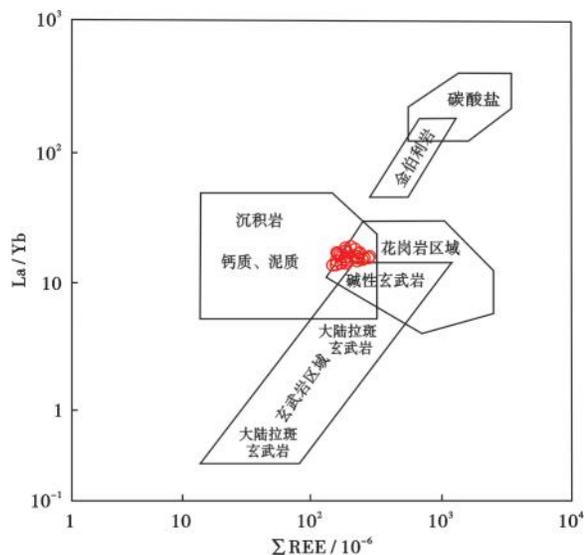


图 13 古龙凹陷青山口组页岩的 La/Yb— $\Sigma$ REE 图解

Fig. 13 La/ YB— $\Sigma$ REE diagram of shale in Qingshankou Formation of Gulong sag

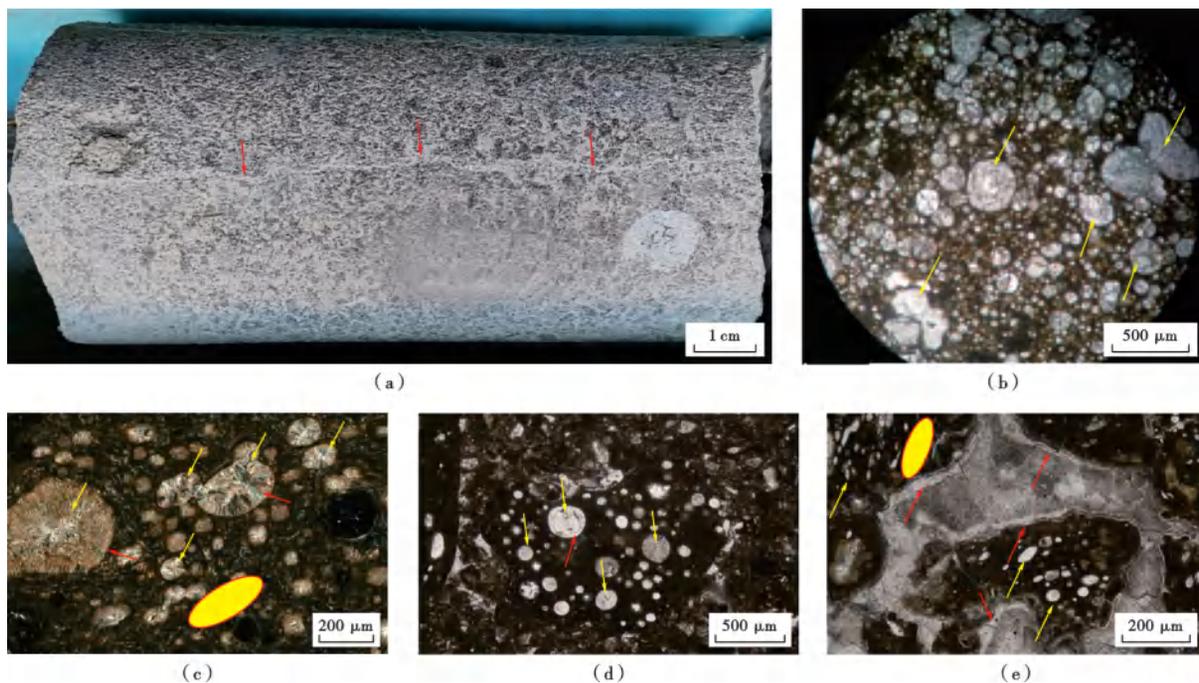
理呈高角度相交[图 15(f)],其中,发育了微米级的碳酸盐矿物颗粒,其长轴与有机质条带方向相同[图 15(d)].定向排列可能与岩浆热液流动的影响有关。由于岩浆

热液高温的影响,有机质强烈碳化,使整个薄片呈现黑色[图 15(e)],状如黑色玻璃。

岩心上岩浆热液作用证据的发现为古龙凹陷青山口组页岩有机质的超高成熟<sup>[41]</sup>和轻质油在超浅层的形成提供了可的成因解释,对揭示轻质油油气藏的富集规律提供了新的思路。

### 3.6 综合地球物理证据

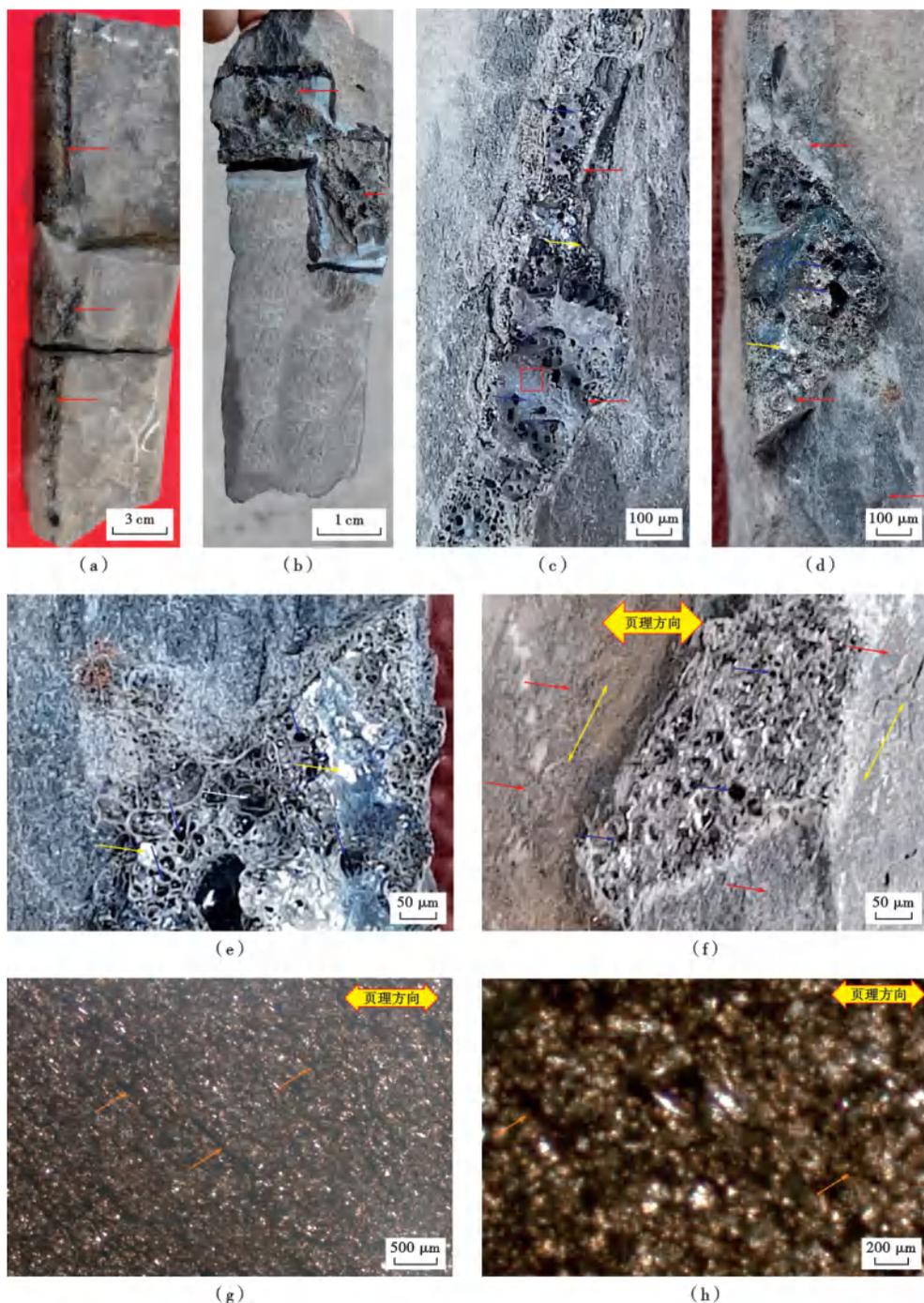
曹金华<sup>[42]</sup>基于地球物理资料,较深入地研究了松辽盆地的深部结构与盖层,绘制综合磁化率、电阻率、地震和密度反演剖面,以及磁性异常和重力异常剖面(图 16)。在穿过古龙断陷(古龙凹陷)—长垣隆起—三肇断陷(徐家围子断陷)的综合地球物理剖面<sup>[42]</sup>上,构造与磁性异常、重力异常和电性异常呈良好的对应关系,具有以下规律:①从东向西,呈现两凹夹一隆的构造格局[图 16(a)]。②古龙凹陷深部的电阻率急剧减小,出现了一个低阻隆起,几乎击穿了盖层[图 16(b)],使盖层的电阻率也变小,这揭示了有岩浆及热液低阻物质(富含导电性好的金属阳离子的流体或导电性好的金属矿)进入了盖层。③古龙凹陷深部的磁化率分布呈“三明治”结构[图 16(c)],其中,底部(深度大于



(a)泥页岩被岩浆热液蚀变后发生角岩化,形成大量球粒构造,中部有一竖直方解石脉(红色箭头),青二段,金 X 井 1904.56 m;(b)杏仁构造,发育不连续的边缘环带(黄色箭头),青二段,金 X 井 1955.98 m,单偏光;(c)杏仁构造(黄色箭头),发育了边缘环,杏仁构造近 NE 向拉长(黄色椭圆),揭示具有流动特征,青二段,金 X 井 1979.32 m,正交偏光;(d)杏仁构造(黄色箭头),圆形,发育在有机质内,青二段,金 X 井 1967.82 m,单偏光;(e)显微杏仁构造(黄色箭头)和碳酸盐环(红色箭头),杏仁构造呈椭圆状,长轴排列具有方向性(黄色椭圆),揭示具有流动特征,主要发育在有机质内,青二段,金 X 井 1960.62 m,单偏光。

图 14 金 X 井岩心及其岩石薄片特征

Fig. 14 Cores and thin section characteristics of Well Jin X



(a)沿近直立缝发育的岩浆热液蚀变条带,部分高近 40 cm,形成了孔隙发育的“玻璃”(红色箭头),青一段,英页 Y 井 2603.27 m; (b)两团岩浆热液蚀变形成的“玻璃”(红色箭头),其中发育了很多气孔,青一段,英页 Y 井 2603.34 m; (c)沿近直立裂缝发育的岩浆热液蚀变带的局部放大(红色箭头),可见黑色“玻璃”中发育大量气孔(蓝色箭头)、少量杏仁(黄色箭头),青一段,英页 Y 井 2603.30 m; (d)呈三角形的岩浆热液蚀变“玻璃”(红色箭头)和气孔(蓝色箭头)及杏仁体(黄色箭头),青一段,英页 Y 井 2603.32 m; (e)“玻璃”局部成泡沫状(白色箭头),发育了大量的丝发、气孔(蓝色箭头)和杏仁构造(黄色箭头),青一段,英页 Y 井 2603.31 m; (f)“玻璃”局部成泡沫状(中心的椭圆形),气孔发育(蓝色箭头),其中的黏土矿物呈定向排列,周缘也发育了大量呈定向排列的黏土矿物(红色箭头),排列方向(黄色双箭头)与页理呈高角度相交,青一段,英页 Y 井 2603.33 m; (g)图(c)中红框处的显微特征,可见变质有机质(橙色箭头)被强烈拉长,顺一个方向优选排列(橙色箭头),与页理(黄色双箭头)呈一定夹角,可能与热液的流动牵引有关,见大量微米级碳酸盐矿物颗粒,有机质变质强烈,几乎完全碳化变黑,青一段,英页 Y 井 2603.30 m,单偏光; (h)图(d)中蓝框处的显微特征,其中的有机质大部分呈颗粒状,多个颗粒排列成线状(橙色箭头),与页理呈高角度相交,其中的矿物颗粒也呈定向排列,与有机质的排列方向相同,定向特征与岩浆热液流体的流动牵引作用有关,有机质变质强烈,几乎完全碳化变黑,青一段,英页 Y 井 2603.32 m,单偏光。

图 15 沿英页 Y 井岩心裂缝发生的岩浆热液蚀变

Fig. 15 Magmatic hydrothermal alteration occurring along core fractures of Well Yingye Y

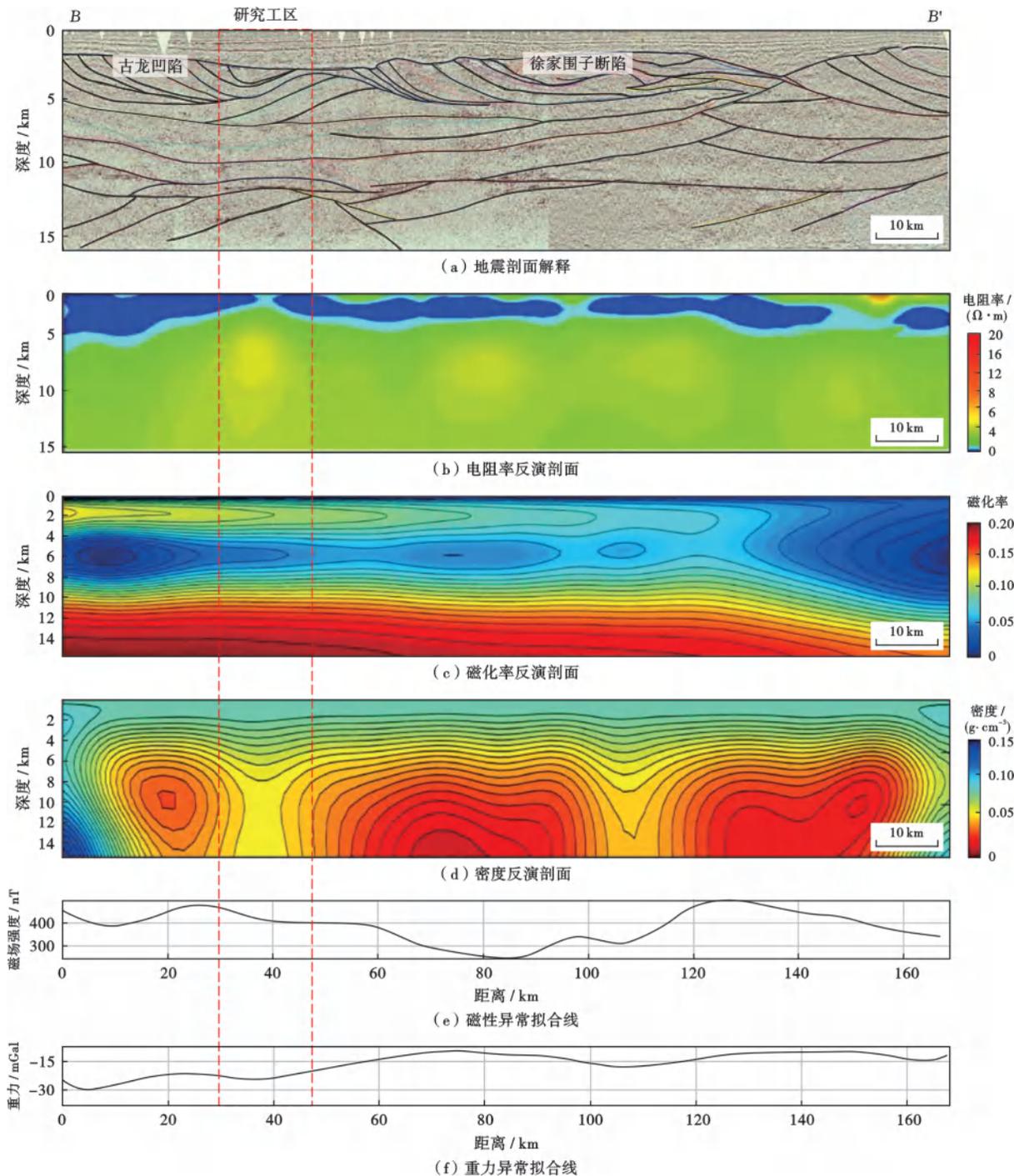


图 16 松辽盆地北部综合地球物理剖面(据文献[42]修改,剖面位置见图 1)

Fig. 16 Comprehensive geophysical section of the northern Songliao Basin

11 km)磁化率大,中部(深度为 4~11 km,相当于古生界)磁化率小,顶部(深度为 1~3 km)磁化率中等;顶部带对应于三叠系、侏罗系和下白垩统,青山口组正好落在这个层段;磁化率与铁磁性物质(Fe、Cr、CO 和 Ni)密切相关,铁磁性物质均来自岩浆热液,并在扫描电镜和能谱分析中已发现(图 10)。④古龙凹陷的深部基底密度较小[图 16(d)],揭示有高温和流体介入。⑤古龙凹陷位于磁化异常和重力中等带[图 16(e)、

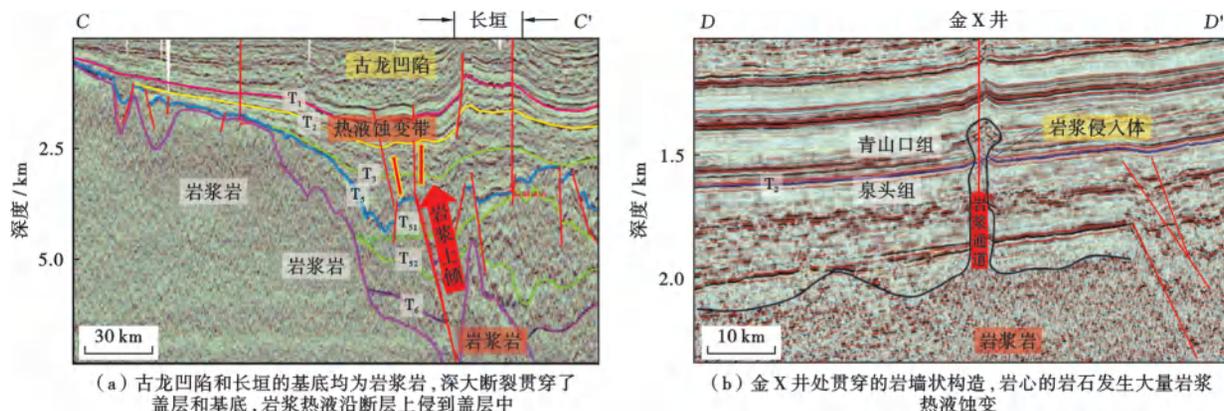
图 16(f)],揭示古龙凹陷的基底既不同于一般的沉积岩,也不同于火山基岩,具有两者兼而有之的特性,这是岩浆热液作用的间接证据。古龙凹陷的青山口组具有低密度、高磁性和低电阻的特点,并在中生代印支构造运动影响下发生断裂活动和岩浆活动,岩浆上涌形成了多处断陷构造,如古龙断陷和徐家围子断陷<sup>[42]</sup>。

### 3.7 地震剖面上的岩浆热液作用证据

古龙凹陷基底为一套火山岩,基底之上的盖层沉

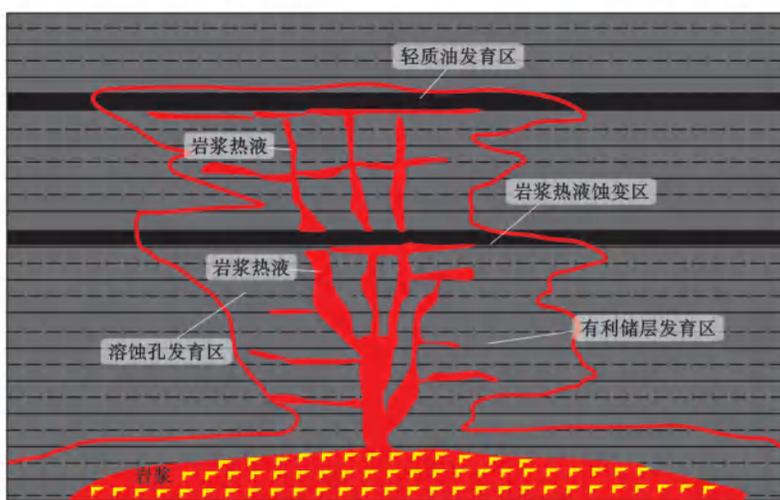
积包括白垩系、古近系、新近系和第四系<sup>[8]</sup>。古龙凹陷下部地垒在早期经历了断陷活动,发育了一些近直立的深大正断层[图 17(a)],断层为岩浆及热液的上涌提供了通道,并形成岩墙状构造[图 17(b)]。金 X 井的青一段可见由岩浆蚀变形成的角岩化岩心[图 14(a)],这是青山口组泥页岩接受岩浆及热液作用的结果,时间大约在距今 70 Ma 的明水组沉

积期<sup>[40]</sup>,热液蚀变及其高温使得有机质及其先期形成的原油再度被热解,形成轻质油[图 17(c)]。中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院大庆物探研究院近期的研究表明,在整个齐家—古龙凹陷,青山口组之下有大范围的岩浆热液形成的地震反射异常,推测整个齐家—古龙凹陷遭受了较广泛的岩浆作用的影响。



(a) 古龙凹陷和长垣的基底均为岩浆岩,深大断裂贯穿了盖层和基底,岩浆热液沿断层上侵到盖层中

(b) 金 X 井处贯穿的岩墙状构造,岩心的岩石发生大量岩浆热液蚀变



(c) 岩浆热液上侵模式



注: T<sub>1</sub>—嫩江组底界; T<sub>2</sub>—青山口组底界; T<sub>3</sub>—泉头组底界; T<sub>5</sub>—火石岭组底界; T<sub>51</sub>—石炭系—二叠系内部界面; T<sub>52</sub>—石炭系—二叠系内部界面; T<sub>6</sub>—石炭系—二叠系底界。

图 17 岩浆热液作用及其储层效应(剖面位置见图 1)

Fig. 17 Magmatic hydrothermal action and its reservoir effect

## 4 结 论

(1) 古龙凹陷青山口组页岩油储层遭受了强烈的岩浆热液作用,形成了热液成因的黄铜矿、自然铜、闪锌矿和硫化锌矿、硫化银矿、Fe-Cr-Ni-Mo 和 Ni-Fe-Mo 合金、重晶石、氟磷灰石、氧化钛矿物等热液矿物。

(2) 除岩浆热液矿物外,在古页 Z 井的岩心渗出油中还检测到高温岩浆热液元素(铌、钽、钨和汞)。这

些元素是壳幔循环元素,结合其他岩浆热液成因矿物,有理由认为这些元素为高温岩浆热液作用元素,并推测古龙页岩的岩浆热液来自于深部,甚至幔源。

(3) 在齐家—古龙凹陷北部,金 X 井和英页 Y 井的青山口组页岩中发现了大量岩浆热液蚀变形成的角岩、气孔构造、杏仁构造和“玻璃”;古龙凹陷的地震剖面上有明显的岩浆侵入证据,尤其是在过金 X 井的地震剖面上可见到岩墙状构造。

(4) 古龙凹陷青山口组页岩储层中,白云岩的碳、氧同位素分析揭示其为热液成因。在遭受岩浆蚀变作用的岩心中,方解石脉中盐水包裹体的均一温度可达130.0~166.8℃,明显高于正常地温。

(5) 岩浆热液提供的异常地热是古龙凹陷青山口组页岩储层发育轻质油的关键。因此,研究古龙凹陷青山口组页岩的储集空间及其轻质油的分布规律必须充分考虑岩浆热液作用的影响。

**致谢** 研究得到了大庆油田有限责任公司勘探开发研究院岩心库在观察岩心上的支持,吉林大学孟繁莉教授和审稿专家对论文的修改和完善提出了宝贵意见,在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] 金之钧,朱东亚,胡文璋,等.塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J].地质学报,2006,80(2):245-253.  
JIN Zhijun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 245-253.
- [2] 朱东亚,金之钧,胡文璋.塔中地区热液改造型白云岩储层[J].石油学报,2009,30(5):698-704.  
ZHU Dongya, JIN Zhijun, HU Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area[J]. Acta Petroli Sinica, 2009, 30(5): 698-704.
- [3] 王坤,胡素云,胡再元,等.塔里木盆地古城地区寒武系热液作用及其对储层发育的影响[J].石油学报,2016,37(4):439-453.  
WANG Kun, HU Suyun, HU Zaiyuan, et al. Cambrian hydrothermal action in Gucheng area, Tarim Basin and its influences on reservoir development[J]. Acta Petroli Sinica, 2016, 37(4): 439-453.
- [4] 陈轩,赵文智,张利萍,等.川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义[J].石油学报,2012,33(4):562-569.  
CHEN Xuan, ZHAO Wenzhi, ZHANG Liping, et al. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2012, 33(4): 562-569.
- [5] 金小燕,杜晓峰,王清斌,等.渤海海域火山热流体及其对碳酸盐岩优质储层的控制作用[J].石油实验地质,2018,40(6):800-807.  
JIN Xiaoyan, DU Xiaofeng, WANG Qingbin, et al. Volcanic hydrothermal fluid activity and its influence on carbonate reservoirs in Bohai Sea area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(6): 800-807.
- [6] 董月霞,周海民,夏文臣.南堡凹陷火山活动与裂陷旋回[J].石油与天然气地质,2000,21(4):304-307.  
DONG Yuexia, ZHOU Haimin, XIA Wenchen. Volcanic activities and rift-subsidence cycles in Nanpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 304-307.
- [7] 王玉萍,董春梅,陈洪德,等.鄂尔多斯盆地中西部奥陶纪热液活动的证据及其对储层发育的影响[J].海相油气地质,2014,19(2):23-31.  
WANG Yuping, DONG Chunmei, CHEN Hongde, et al. Petrological evidence of Ordovician hydrothermal activities and its geological significance to reservoir development in central and western parts of Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(2): 23-31.
- [8] 何文渊,赵莹,钟建华,等.松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩油储层中微米孔缝特征及油气意义[J].岩性油气藏,2024,36(3):1-18.  
HE Wenyuan, ZHAO Ying, ZHONG Jianhua, et al. Characteristics and significance of micron pores and micron fractures in shale oil reservoirs of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulung sag, Songliao Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(3): 1-18.
- [9] 陈昭年,陈发景.松辽盆地反转构造运动学特征[J].现代地质,1996,10(3):390-396.  
CHEN Zhaonian, CHEN Fajing. Kinematic characteristics of inversion structures in Songliao Basin[J]. Geoscience, 1996, 10(3): 390-396.
- [10] 王凤兰,付志国,王建凯,等.松辽盆地古龙页岩油储层特征及分类评价[J].大庆石油地质与开发,2021,40(5):144-156.  
WANG Fenglan, FU Zhiguo, WANG Jiankai, et al. Characteristics and classification evaluation of Gulung shale oil reservoir in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 144-156.
- [11] 高瑞祺.泥岩异常高压带油气的生成排出特征与泥岩裂缝油气藏的形成[J].大庆石油地质与开发,1984,3(1):160-167.  
GAO Ruiqi. Characteristics of petroleum generation and expulsion in abnormal pressure shale zones and the formation of fractured shale reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1984, 3(1): 160-167.
- [12] 孙龙德,刘合,何文渊,等.大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J].石油勘探与开发,2021,48(3):453-463.  
SUN Longde, LIU He, HE Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulung shale oil in Daqing oilfield, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 453-463.
- [13] 孙龙德.古龙页岩油(代序)[J].大庆石油地质与开发,2020,39(3):1-7.  
SUN Longde. Gulung shale oil (preface)[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 1-7.
- [14] 何文渊,蒙启安,冯子辉,等.松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J].石油学报,2022,43(1):1-14.  
HE Wenyuan, MENG Qi'an, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory & exploration and development practice of Gulung shale oil in Songliao Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2022, 43(1): 1-14.
- [15] 何文渊,崔宝文,王凤兰,等.松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组储集空间与油态研究[J].地质论评,2022,68(2):693-741.  
HE Wenyuan, CUI Baowen, WANG Fenglan, et al. Study on reservoir spaces and oil states of the Cretaceous Qingshankou Formation in Gulung sag, Songliao Basin[J]. Geological Review, 2022, 68(2): 693-741.
- [16] 何文渊,赵莹,钟建华,等.松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩油储层中有机质微孔特征[J].地质论评,2023,69(3):1161-1183.  
HE Wenyuan, ZHAO Ying, ZHONG Jianhua, et al. Study on organic matter and micropores of Qingshankou Formation shale oil reservoir in Gulung sag, Songliao Basin[J]. Geological Review, 2023, 69(3): 1161-1183.
- [17] 何文渊,白雪峰,钟建华,等.松辽盆地古龙页岩油储层干酪根的有机元素组成及其N元素的地球化学意义[J].地质学报,2024,98(6):1840-1866.

- HE Wenyuan, BAI Xuefeng, ZHONG Jianhua, et al. Organic element compositions and its N geochemical significances of the kerogen of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(6): 1840-1866.
- [18] 何文渊, 崔宝文, 张金友, 等. 松辽盆地北部嫩江组中-低成熟页岩油地质特征及勘探突破[J]. *石油学报*, 2024, 45(6): 900-913.  
HE Wenyuan, CUI Baowen, ZHANG Jinyou, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of the middle to low mature shale oil of Nenjiang Formation in northern Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(6): 900-913.
- [19] 张博为, 张居和, 冯子辉, 等. 松辽盆地青山口组古龙页岩轻质原油形成地质条件与资源潜力[J]. *石油学报*, 2021, 42(12): 1625-1639.  
ZHANG Bowei, ZHANG Juhe, FENG Zihui, et al. Geological conditions and resource potential for the formation of light crude oil from Gulong shale in Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(12): 1625-1639.
- [20] DAVIESGR, SMITH JRLB. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [21] 何文渊. 松辽盆地古龙页岩油储层黏土中纳米孔和纳米缝的发现及其意义[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(3): 1-13.  
HE Wenyuan. Discovery and significance of nano pores and nano fractures of clay in Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 1-13.
- [22] 何文渊. 松辽盆地古龙凹陷页岩油储层中的纳孔纳缝及其原位成藏理论初探[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 156-173.  
HE Wenyuan. Preliminary study on nanopores, nanofissures, and in situ accumulation of Gulong shale oil[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 156-173.
- [23] BENNETT R H, BRYANT W R, KELLER G H. Clay fabric and geotechnical properties of selected submarine sediment cores from the Mississippi Delta[R]. *Mississippi*; No. 9, U. S. Department of Commerce/NOAA/ERL, 1977.
- [24] GUY PLINT A. Mud dispersal across a Cretaceous prodelta: storm-generated, wave-enhanced sediment gravity flows inferred from mudstone microtexture and microfacies[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(3): 609-647.
- [25] FONTANA E, MEXIAS A S, RENAC C, et al. Hydrothermal alteration of volcanic rocks in Seival Mine Cu-mineralization-Camaquã Basin-Brazil (part I): chloritization process and geochemical dispersion in alteration halos[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 177: 45-60.
- [26] BARTON P B, BETHKEP M. Chalcopyrite disease in sphalerite: pathology and epidemiology[J]. *American Mineralogist*, 1987, 72(5/6): 451-467.
- [27] LEPETIT P, BENTE K, DOERING T, et al. Crystal chemistry of Fe-containing sphalerites[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2003, 30(4): 185-191.
- [28] COOK N J, CIOBANU C L, PRING A, et al. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(16): 4761-4791.
- [29] MARTÍN J D, SOLER I GIL A. An integrated thermodynamic mixing model for sphalerite geobarometry from 300 to 850 °C and up to 1 GPa [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(4): 995-1006.
- [30] MAO Zhibao, CHENG Yanbo, LIU Jiajun, et al. Geology and molybdenite Re-Os age of the Dahutang granite-related veinlets-disseminated Tungsten ore field in the Jiangxin Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 422-433.
- [31] VILA T, SILLITOE R H. Gold-rich porphyry systems in the Maricunga Belt, northern Chile[J]. *Economic Geology*, 1991, 86(6): 1238-1260.
- [32] ABIDI R, SLIM-SHIMI N, MARIGNAC C, et al. The origin of sulfate mineralization and the nature of the BaSO<sub>4</sub>-SrSO<sub>4</sub> solid-solution series in the Ain Allega and El Aguiba ore deposits, northern Tunisia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 165-179.
- [33] KUSAKABE M, ROBINSON B W. Oxygen and sulfur isotope equilibria in the BaSO<sub>4</sub>-HSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O system from 110 to 350°C and applications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41(8): 1033-1040.
- [34] LUPULESCU M V, HUGHES J M, CHIARENZELLI J R, et al. Texture, crystal structure, and composition of fluorapatites from iron oxide-apatite (ioa) deposits, eastern Adirondack Mountains, New York[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2017, 55(3): 399-417.
- [35] APUKHTINA O B, KAMENETSKY V S, EHRIG K, et al. Early, deep magnetite-fluorapatite mineralization at the Olympic dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia[J]. *Economic Geology*, 2017, 112(6): 1531-1542.
- [36] LEROY N, BRES E. Structure and substitutions in fluorapatite [J]. *European Cells & Materials*, 2001, 2: 36-48.
- [37] SLACK J F, KELLEY K D, ANDERSON V M, et al. Multistage hydrothermal silicification and Fe-Ti-As-Sb-Ge-REE enrichment in the red dog Zn-Pb-Ag district, northern Alaska: geochemistry, origin, and exploration applications[J]. *Economic Geology*, 2004, 99(7): 1481-1508.
- [38] DOBRZHINETSKAYA L, BOZHILOV K N, GREEN II H W. The solubility of TiO<sub>2</sub> in olivine: implications for the mantle wedge environment[J]. *Chemical Geology*, 2000, 163(1/4): 325-338.
- [39] MILLIKEN K L. The silicified evaporite syndrome—two aspects of silicification history of former evaporite nodules from southern Kentucky and northern Tennessee[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, 49(1): 245-256.
- [40] SUN Ningliang, HE Wenyuan, ZHONG Jianhua et al. Widespread development of bedding-parallel calcite veins in medium-high maturity organic-rich lacustrine shales (Upper Cretaceous Qingshankou Formation, northern Songliao Basin, NE China): implications for hydrocarbon generation and horizontal compression[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 158: 106544.
- [41] 朱国文, 王小军, 张金友, 等. 松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 110-124.  
ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 110-124.
- [42] 曹金华. 松辽盆地综合地球物理剖面地质解释[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
CAO Jinhua. Geological interpretation of integrated geophysical profile in Songliao Basin, NE China[D]. Changchun: Jilin University, 2017.