

查干凹陷早白垩世热流体活动的证据及其对巴音戈壁组碎屑岩储层的影响

魏巍^{1,2},朱筱敏^{1,2},谈明轩^{1,2},吴陈冰洁^{1,2},薛梦戈^{1,2},国殿斌³,蒋飞虎³,吕思翰⁴

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

3. 中国石化中原油田分公司石油勘探开发研究院,河南 濮阳 457001;

4. 中国石油大庆油田采油三厂电力大队,黑龙江 大庆 163000]

摘要:基于沉积、储层和构造特征,应用流体包裹体和碳、氧同位素等技术手段,结合岩心、薄片及扫描电镜观察,发现查干凹陷早白垩世苏红图组沉积时期为走滑-拉分断陷期,伴随多期中-基性安山岩和玄武岩为主的火山活动及其对应的热流体活动。苏红图组火山喷发及热流体活动,影响了巴音戈壁组埋深2 800 m以下地层,主要体现在古大地热流异常高值、包裹体均一温度异常增高、碳同位素显示无机成因特征、镜质体反射率突变及粘土矿物转化异常这5个方面。深部的热流体携带CO₂等气体,主要沿毛西断裂上侵,进入乌力吉构造带,通过微裂缝和不整合面等通道发生横向运移,主要溶蚀巴音戈壁组储层碳酸盐等矿物,其次为长石颗粒。溶蚀作用发育的优先部位,主要在靠近控制岩浆侵入体的深大断裂,其次受不整合面及次级断裂和裂缝等控制;向凹陷内部,溶蚀作用减弱。深部热流体活动对区内有机质热演化和储层物性的影响,是研究区内溶蚀孔洞发育及分布的主控因素,也是勘探大规模油气藏的关键。

关键词:碳、氧同位素;溶蚀作用;热流体活动;巴音戈壁组;查干凹陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

The Early Cretaceous thermal fluid activities and their impacts on clastic reservoir rocks in the Bayingebi Formation of Chagan Sag

Wei Wei^{1,2}, Zhu Xiaomin^{1,2}, Tan Mingxuan^{1,2}, Wu Chenbingjie^{1,2}, Xue Mengge^{1,2}, Guo Dianbin³, Jiang Feihu³, Lyu Sihan⁴

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China;

4. Electric Power Group, No. 3 Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163000, China)

Abstract: Analyses of sedimentary, reservoir, and structural characteristics, were combined with application of such technologies as fluid inclusion and carbon and oxygen isotopes techniques, and observations of cores, thin sections and scanning electron microscope images, to study deposition during the Early Cretaceous Suhongtu stage in Chagan Sag. The result indicates a strike-slip and pull-apart faulting stage accompanied by multi-stage volcanic activities of thermal fluid flows dominated by neutral-basic andesite and subordinate basalt. The thermal fluid activities during the Suhongtu volcanic eruptions exerted significant influence upon layers deeper than 2 800 meters in the Bayingebi Formation and resulted in an abnormal high value of paleo-heat flow, an abnormal increase of homogenization temperature of inclusions, inorganic characteristics of carbon isotopes, an abrupt change in vitrinite reflectance, and an abnormal conversion of clay minerals. The thermal fluids from the deep layers carried gases (mainly CO₂) and migrated upward along the Maoxi faults into the Wuliji tectonic belt. They then migrated horizontally along micro fissures and channels formed by unconformities to dissolve mostly carbonates and feldspar in the Bayingebi Formation. The signs of erosion were mainly found in places near

收稿日期:2016-03-10;修订日期:2016-12-23。

第一作者简介:魏巍(1988—),女,博士,储层沉积和成岩研究。E-mail:hunqiu8854@gmail.com。

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05001-002)。

deep-rooted large faults that controlled the migration of the fluids. Unconformities as well as secondary faults and fractures also played a part in controlling the flow of the thermal fluids. The dissolution was observed to be weakened toward the inner part of the sag. We therefore suggest that a study on the effect of deep thermal fluids activities upon the thermal evolution of organic matters and physical properties of reservoirs is the key to understand the distribution of dissolved pores and cavities in the study area and to explore for high-quality reservoirs there.

Key words: carbon and oxygen isotope, dissolution, thermal fluid activity, Bayingebi Formation, Chagan Sag

长期以来,人们对流体的研究局限在沉积盆地内部。随着越来越多的沉积盆地发现了深部热流体活动,它在地质过程中所起的作用日益引起人们的重视^[1-12]。目前,对深部流体的含义还没有统一的标准和明确的认识。本文采用金之钧的划分方案,将基底以下的热流体称作深部热流体,包括深部地壳热流体和上地幔热流体,主要与岩浆-火山活动有关^[6]。Anderson指出,沉积盆地实际上是一个巨大的低温热化学反应器,深部热流体对盆地的温度场产生重要影响,不仅加速围岩中有机质生烃速率^[4],还对盆地的地质构造、岩石演化、流体活动和油气成藏会产生重大影响^[5-14]。因此,加强深部热流体活动的研究,不仅可以进一步深化对它的认识,而且对于在深部热流体活动频繁的盆地进行油气分布规律预测和油气勘探都具有重要的指导作用。

查干凹陷早白垩世苏红图组沉积时期,火山活动十分强烈,凹陷内火山岩体发育,主要以中-基性安山岩和玄武岩为主^[15-17]。在火山活动剧烈的乌力吉构造带中,祥6-1和祥8等见油气显示井的巴音戈壁组碎屑岩,发育大量异常的“黄豆状”大小不等的孔洞^[18-19],可能与区内发生的热流体活动有关。然而,查干凹陷勘探程度较低,前人主要致力于层序、沉积和构造演化的研究,未曾涉及热流体活动的研究^[20-23]。因此,研究区是否发生热流体活动,及其对区内烃源岩热演化和碎屑岩储层的影响机制等,为急需解决的问题。本文在全面搜集和整理查干凹陷自勘探以来储层分析化验资料的基础上,基于83个流体包裹体、59个粘土X-衍射及69个镜质体反射率等数据,从13口新老井中钻取31块样品进行碳、氧同位素等测试,结合岩心、薄片及扫描电镜观察等方法,确定区内发生热流体活动的证据,讨论其对储层的影响,为本区的油气勘探提供基础地质信息,也为油气分布预测提供新观点和依据。

1 地质背景

银根-额济纳旗盆地(简称“银-额盆地”)位于

四大板块(塔里木、哈萨克斯坦、西伯利亚、华北板块)结合部位,处于内蒙古自治区西部。查干凹陷位于内蒙古乌拉特后旗,银-额盆地的东北端,北西和西侧与西尼凸起为邻,东邻楚干凸起,东南侧紧靠狼山,是一个勘探程度较低的凹陷。查干凹陷北东长60 km,北西宽40 km,勘探面积约2 000 km²(图1)。查干凹陷长轴方向上表现为典型的单断箕状特征,以南西侧深拗、北东侧翘升为主;短轴方向上具有凹、隆相间的基本特点,自西向东三分为西部次凹、毛墩次凸和东部次凹。西部次凹是主要勘探区域,地层发育全面、厚度大,主要发育下白垩统,自下而上发育巴音戈壁组[巴一段(K_1b^1)、巴二段(K_1b^2)]、苏红图组[苏一段(K_1s^1)、苏二段(K_1s^2)]和银根组(K_1y),与其下的二叠系及其上的上白垩统乌兰苏海组(K_1w)均呈角度不整合^[20-23]。其中,以次级同生断层(巴润断层)为界,西部次凹可分为上升盘的虎勒洼陷-中央构造带和下降盘的额很洼陷-乌力吉构造带^[19]。

查干凹陷是发育在晚古生代褶皱基底之上的早白垩世陆内拉分盆地。早白垩世初期,受燕山Ⅲ幕影响,凹陷主要沉积近岸水下扇-半深湖和扇三角洲-滨浅湖相的巴音戈壁组,最厚可达2 600 m。在苏红图期,随着走滑拉分作用加强,深部物质上涌和喷发,频繁发生火山活动,形成多套中-基性火山岩-滨浅湖交互沉积地层^[15-23],沉积厚度达2 800 m以上,火山岩厚度最大达600 m。苏红图末期发生的燕山Ⅳ运动幕,导致凹陷发生强烈的“构造反转”运动,苏红图组上部地层遭受强烈剥蚀,北部剥蚀量最大,可达800 m。而后凹陷进入断-拗转化期,火山喷发结束,银根组以区域性截不整合形式上覆于苏红图组之上。晚白垩世至今,盆地进入稳定拗陷阶段,沉积了厚度较大的乌兰苏海组和新生代地层。

2 热流体活动的证据

查干凹陷的演化过程中,受燕山Ⅲ幕影响,深部岩浆总是寻找薄弱之处(如构造应力场低值区、剪切应力

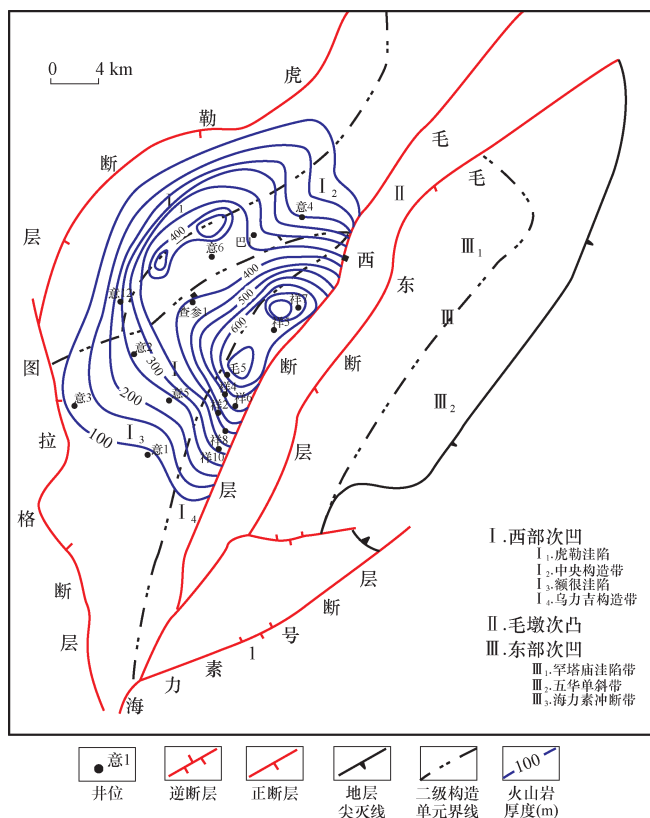


图2 查干凹陷苏红图组火山岩平面分布特征

Fig.2 Distribution of volcanic rocks in the Suhongtu Formation, Chagan Sag

使地壳深部的能量大量释放到地表,造成早白垩世的高地热状态。

结合前人研究,苏红图组沉积时期的大地热流值在平面上整体表现为毛敦次凸最高,东部次凹次之,西部次凹较低(图3a)。这主要与大地热流折射有关,即大地热流受基底构造形态及其上覆沉积盖层厚度控制,由于凹陷区沉积岩厚度大、岩石热导率较低,热流发生“折射”向毛敦凸起运移导致(图3a,b)。在西部次凹中,大地热流值紧邻毛西断层带最高,达 80 mW/m^2 ;向次凹中部逐渐减低,在额很洼陷低至 58 mW/m^2 。然而,在乌力吉构造带祥8和毛10井区(图3a),热流值较高,但古地貌显示该区并非凸起区(图3b),推断并非大地热流折射成因。苏红图组火山活动剧烈,毛10井区在早白垩世为强火山活动区(图2),祥8井区次级断裂发育,推断深层热流体伴随岩浆活动沿断裂上涌,导致火山活动区(如毛10井)和断裂发育区(如祥8井)古大地热流值高^[13]。因此,研究区乌力吉构造带高热流值与火山喷发伴随的深层热流活动有关。

2.2 流体包裹体均一温度

流体包裹体测得的均一化温度可以视为岩石经历

最大温度的有用记录^[28],因此可作为热流体活动的直接证据。结果表明,流体包裹体均一温度主要分布于3个区间,分别为 $80 \sim 100$ 、 $110 \sim 160$ 和 $180 \sim 190$ $^{\circ}\text{C}$ (图4)。所测流体包裹体均为含烃的盐水包裹体,形态较规则。第一、第二期流体包裹体主要呈带状、群状赋存于石英或石英加大边中,其次赋存于自生方解石中;第三期流体包裹体主要呈串珠状赋存于石英的微裂缝中。前人研究表明,研究区巴音戈壁组储层曾发生两期油气充注,分别为苏红图组沉积晚期($103 \sim 105 \text{ Ma}$)和银根组沉积中、晚期($97 \sim 99 \text{ Ma}$),对应的流体包裹体均一温度分别为 $80 \sim 100$ $^{\circ}\text{C}$ 和 $110 \sim 150$ $^{\circ}\text{C}$ ^[24-25],与本文测试的前两期流体包裹体均一温度相吻合。然而,测试结果中第三期流体包裹体的均一温度($180 \sim 190$ $^{\circ}\text{C}$)远高于油气充注温度。以乌力吉构造带祥2井为例,埋藏史和热史模拟结果显示,查干凹陷巴音戈壁组在银根组沉积末期达到最大埋深 3000 m 和最高地温 160 $^{\circ}\text{C}$ ^[24](图5)。此外,力平1和毛10井的流体包裹体均一温度也较高(图4),推测主要由不同期次岩浆上涌,携带深部热流体脉冲式上升导致^[6-10]。

2.3 碳、氧同位素特征

查干凹陷下白垩统巴音戈壁组储层发育大量的碳酸盐胶结物,而碳酸盐胶结物中碳、氧同位素组成可反映其形成时的地球化学环境特征和物质来源等,有助于阐明成岩过程中流体-岩石相互作用、流体演化史和热史等基本地质问题。不同来源的碳,由于母质类型与形成环境不同,其碳同位素组成存在明显差异。湖相原生碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值处于 $-6\text{‰} \sim -2\text{‰}$;大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值在 -7‰ 左右;与岩浆活动伴生的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 较重,在 $3\text{‰} \sim 12\text{‰}$;而与有机质脱羧有关的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 较轻,分布在 $-30\text{‰} \sim -10\text{‰}$ ^[29-30]。

结果表明,不同构造带,同一地层碳酸盐胶结物的碳、氧同位素值也不同。在远离毛西断裂的中央构造带和额很洼陷,巴二段碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 相对较轻,处于 $-6.13\text{‰} \sim -2.90\text{‰}$,平均值为 -3.80‰ (图6)。考虑到采集样品所在井主要分布在凹陷中部,离烃源岩很近,碳同位素的低值可能与烃源岩中有机质脱羧基作用有关。在乌力吉构造带,碳酸盐胶结物中 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值主要分布在 $-4.50\text{‰} \sim -0.65\text{‰}$,平均值为 -1.78‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值主要分布在 $-21\text{‰} \sim -12\text{‰}$,平均值在 -17‰ 。由于碳同位素组成较重,大部分样品甚至高于湖相沉积的碳同位素组成,具有无机碳特征,推断可能与大气淡水、碳酸盐岩岩屑

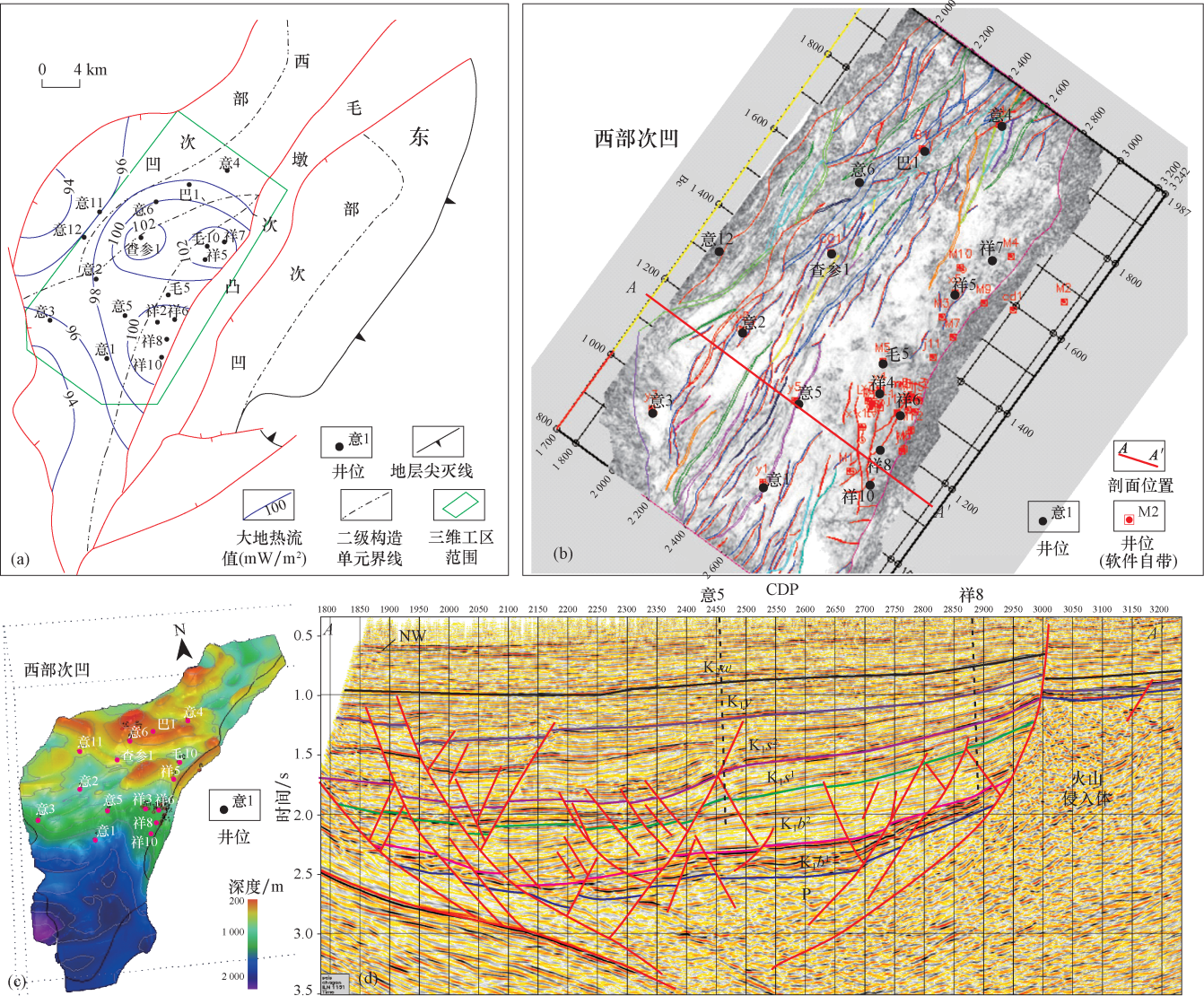


图 3 查干凹陷苏红图组沉积期大地热流演化

Fig. 3 Terrestrial heat fluid value evolution during the deposition of the Suhongtu Formation, Chagan Sag

a. 苏红图组大地热流值分布(据左银辉等,2014 修改),框线指示三维地震工区范围;b. 苏一段底地震水平切片;c. 苏红图组沉积期古地貌;d. Line 1250 测线地震剖面(剖面位置见图 3c)

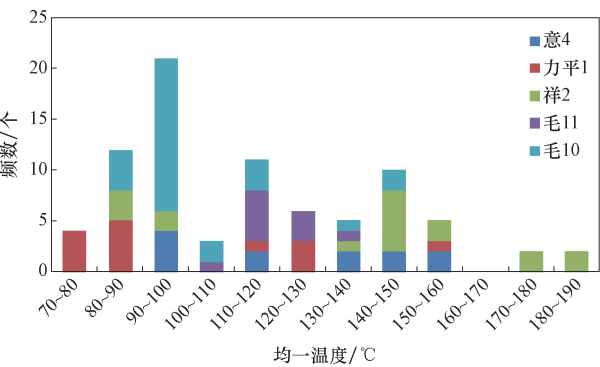


图 4 查干凹陷巴音戈壁组流体包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Histogram of homogenization temperatures of inclusions from the Bayingebi Formation, Chagan Sag

溶解和深部热流体伴随的 CO_2 有关。然而,埋藏史表明,乌力吉构造带巴音戈壁组储层未曾暴露地表,其次,查干凹陷的母岩主要为花岗岩和变质岩,碳酸盐岩地层极少发育^[15-17],由此排除大气淡水和外源碳酸盐成因。因为与岩浆活动伴生的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 较重,并且乌力吉构造带邻近深大断裂,推断无机碳源可能与来自深部热流体伴生的 CO_2 有关。

2.4 镜质体反射率

镜质体反射率(R_o)可以反映成岩过程中有机质赋存的沉积地层最大埋深、古地温及成熟度,为恢复地层剥蚀厚度及判断热流体活动提供重要依据^[31-33]。

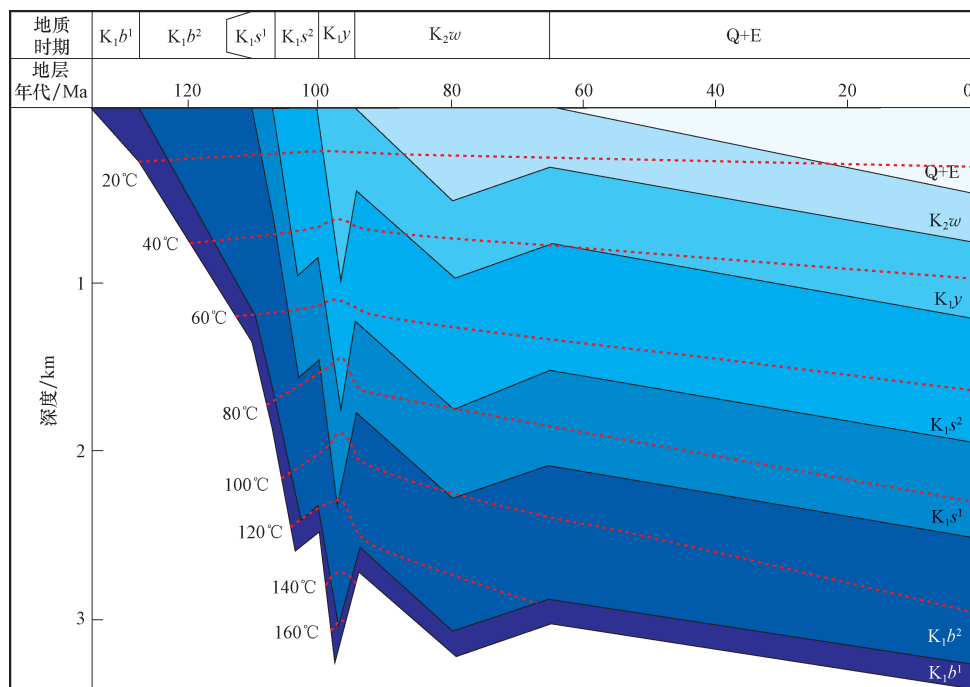


图5 查干凹陷样2井埋藏史和热史

Fig. 5 Burial and thermal history of Well X2 in the Chagan Sag

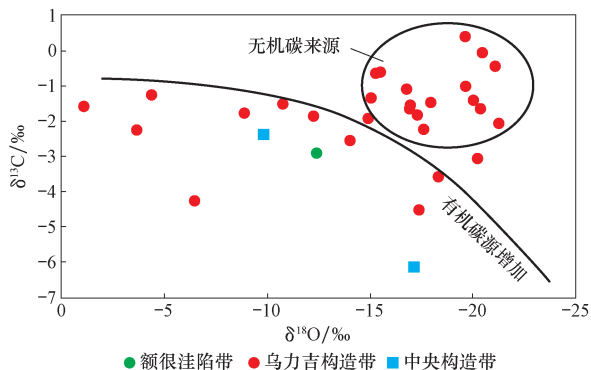


图6 查干凹陷巴音戈壁组二段储层碳酸盐胶结物同位素组成

Fig. 6 C/O stable isotope compositions of carbonate cements from the second member of the Bayingebi Formation in the Chagan Sag

在未剥蚀或不受热流体活动影响的地区,镜质体反射率的对数值($\lg R_o$)与埋深(D)基本上呈线性关系;而在发生剥蚀作用或受热流体活动影响的地区, $\lg R_o - D$ 的变化斜率显示明显的突变,且常常具有明显不同的变化斜率^[34]。通过 $\lg R_o - D$ 的线性变化,结合实际地质背景,不仅可以用于识别不整合面、计算剥蚀厚度,也可用于指示区内的热流体活动。

查干凹陷下白垩统经历了两次较大规模的抬升剥蚀,分别为苏红图组末期和银根组末期^[21-27]。为了避免由剥蚀作用引起的镜质体反射率 R_o 异常,本文建立了巴音戈壁组烃源岩镜质体反射率与深度的关系

(图7)。由图7可见,全区以埋深2 800 m为界,其 $\lg R_o - D$ 的变化斜率发生了一次突变。在埋深2 800 m以上, $\lg R_o - D$ 斜率为2 506;而在埋深2 800 m以下, $\lg R_o - D$ 斜率明显减小,突然降低到724。同样的变化特征在莺歌海盆地、岐口凹陷和东营凹陷等地区均出现过,并且这些地区都发生过强烈的热流体活动^[8-10,12]。由此推断,查干凹陷可能发生过热流体活动,而且规模较大。此外,下部 $\lg R_o - D$ 斜率突变的地层主要分布在乌力吉构造带,如毛11井埋深3 768 m的 R_o 为2.07%。由此推断,查干凹陷的热流体活动主要发生在乌力吉构造带,由于其断裂开启,热流产生的热量持续不断地烘烤基岩和围岩,促进烃源岩成熟,从而引起其反射率快速增加。

2.5 粘土矿物转换

图8是查干凹陷巴音戈壁组地层粘土矿物相对含量随埋深变化的趋势,以埋深2 800 m为界,区内的粘土矿物转变表现为以下两个特征:

1) 浅部地层(埋深1 500~2 800 m),粘土矿物以伊利石为主,其次为绿泥石和高岭石。整体上,粘土矿物转化属于正常演化型。随着埋深增加,高岭石逐渐减少,绿泥石和伊利石增加。该特征早期属于成岩作用早期的典型粘土矿物组合,一般与有机质低成熟-成熟阶段相对应^[35]。

2) 深部地层(埋深2 800 m以下),粘土矿物转化

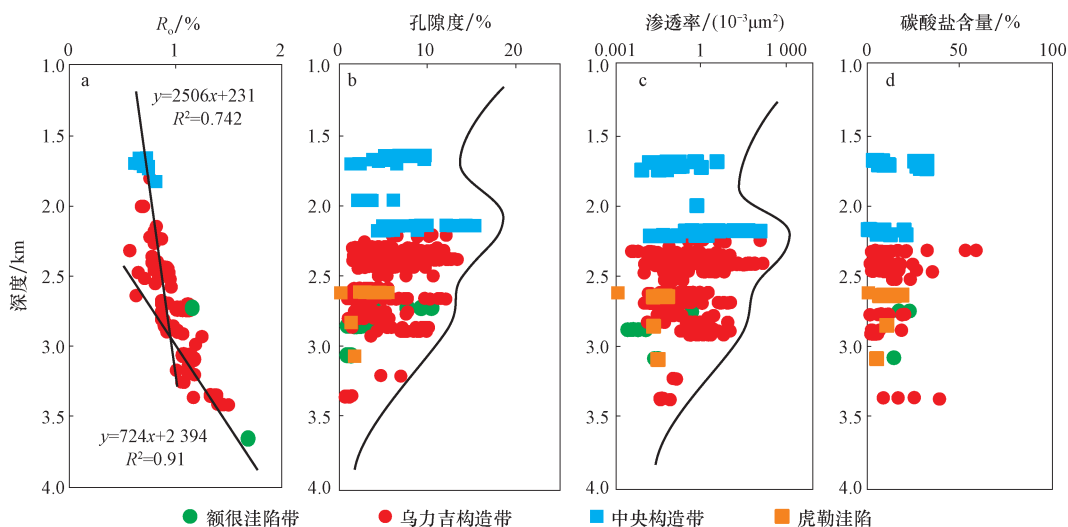


图7 查干凹陷巴音戈壁组烃源岩镜质体反射率(R_o)、储层物性及碳酸盐胶结物特征

Fig. 7 Vitrinite reflectance of source rocks, physical properties of reservoirs, and characteristics of carbonate cement from the Bayingebi Formation in the Chagan Sag

a. R_o - 深度关系; b. 孔隙度 - 深度关系; c. 渗透率 - 深度关系; d. 碳酸盐含量 - 深度关系

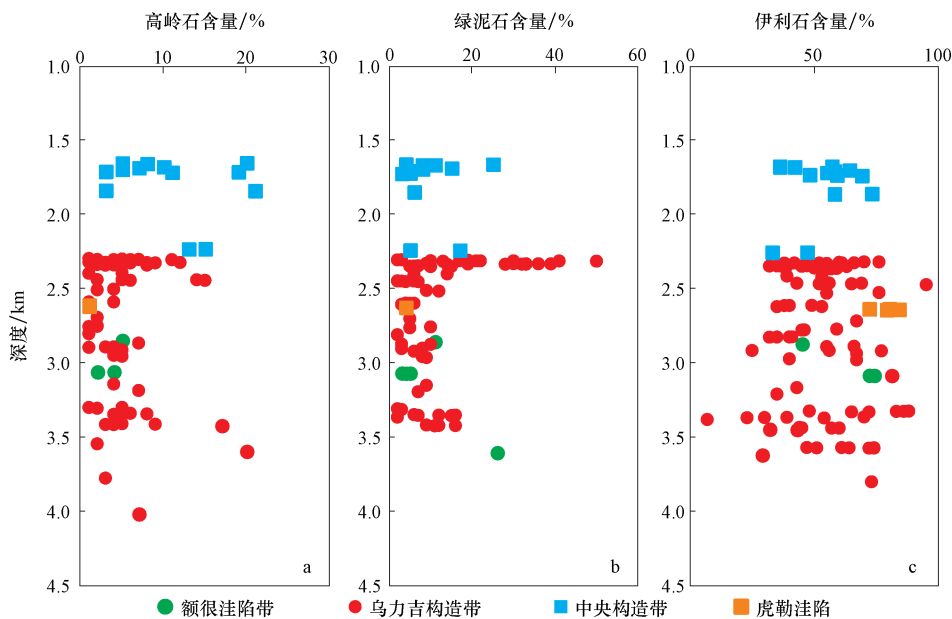


图8 查干凹陷巴音戈壁组粘土矿物相对含量与深度关系

Fig. 8 Relationship between the relative content of clay minerals and depth of sampling in the Bayingebi Formation, Chagan Sag

a. 高岭石; b. 绿泥石; c. 伊利石

出现异常演化,高岭石和绿泥石含量突然增加,伊利石呈低幅度减少。可能是由于岩浆和深部富 CO_2 流体有关:一方面将成岩流体转变为酸性,使砂岩中的钾长石、钠长石等骨架颗粒蚀变成高岭石;另一方面使得局部地层中 CO_2 的分压增高,形成有利于高岭石形成的酸性成岩环境^[12]。此外,基性岩浆和热流体上涌,伴随大量的 Fe 和 Mg 等离子,有利于绿泥石生成^[35]。因此,形成了本区深部地层中高岭石和绿泥石同时存在

的现象。

综上所述,查干凹陷曾发生热流体活动,主要体现在大地热流异常高值、包裹体均一温度异常增高、碳同位素显示无机成因特征、镜质体反射率突变及粘土矿物转化异常这5个方面。结合大地热流演化特征,及热流体活动与断裂、岩浆活动期次匹配分析,推测查干凹陷的深部热流体活动主要发生在苏红图期,主要影响巴音戈壁组埋深2 800 m 以下的地层。当火山活动

时,热流体携带 CO_2 气体沿活动性较强的毛西大断裂向上运移,在侵入通道附近的区域——近断裂分布的乌力吉构造带深部地层,形成了区域内的异常高温区。

3 热流体活动对储层物性的影响

巴音戈壁组储层发育低—超低孔、低渗储层,孔隙度分布在 $0.1\% \sim 26.6\%$, 平均为 6.2% , 渗透率变化在 $(0.003\ 68 \sim 162) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.132 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。如图 7 所示,纵向上发育两个异常高孔带,深度范围为 $1\ 900 \sim 2\ 300\ \text{m}$ 和 $2\ 500 \sim 3\ 100\ \text{m}$, 对应地层 R_0 的高值区和碳酸盐胶结物含量低值区。此外,岩心观察表明,在邻近毛西断裂的乌力吉构造带中,大部分

钻井的巴音戈壁组储层,如样 6-2 井埋深 $2\ 812 \sim 2\ 814\ \text{m}$ 段等,发育大量不同等级的溶蚀孔洞,直径主要分布在 $1 \sim 3\ \text{mm}$, 少量大于 $4\ \text{mm}$, 互不连通,薄片观察溶蚀孔洞主要为碳酸盐胶结物溶蚀(图 9)。根据上述研究,查干凹陷的热流体活动主要发生在毛西断裂附近,主要影响乌力吉构造带巴音戈壁组埋深 $2\ 800\ \text{m}$ 以下的地层,与第二高孔带的深度范围对应,推测区内热流体活动携带 CO_2 进入地层,不仅降低地层 pH 值,形成酸性热流体,还加速有机质热演化,释放大量的有机酸,从而溶蚀储层中的铝硅酸盐和碳酸盐矿物,形成次生孔隙。

由此推断,研究区深部热流体主要影响乌力吉构造带巴音戈壁组储层,主要溶蚀碳酸盐胶结物和铝硅

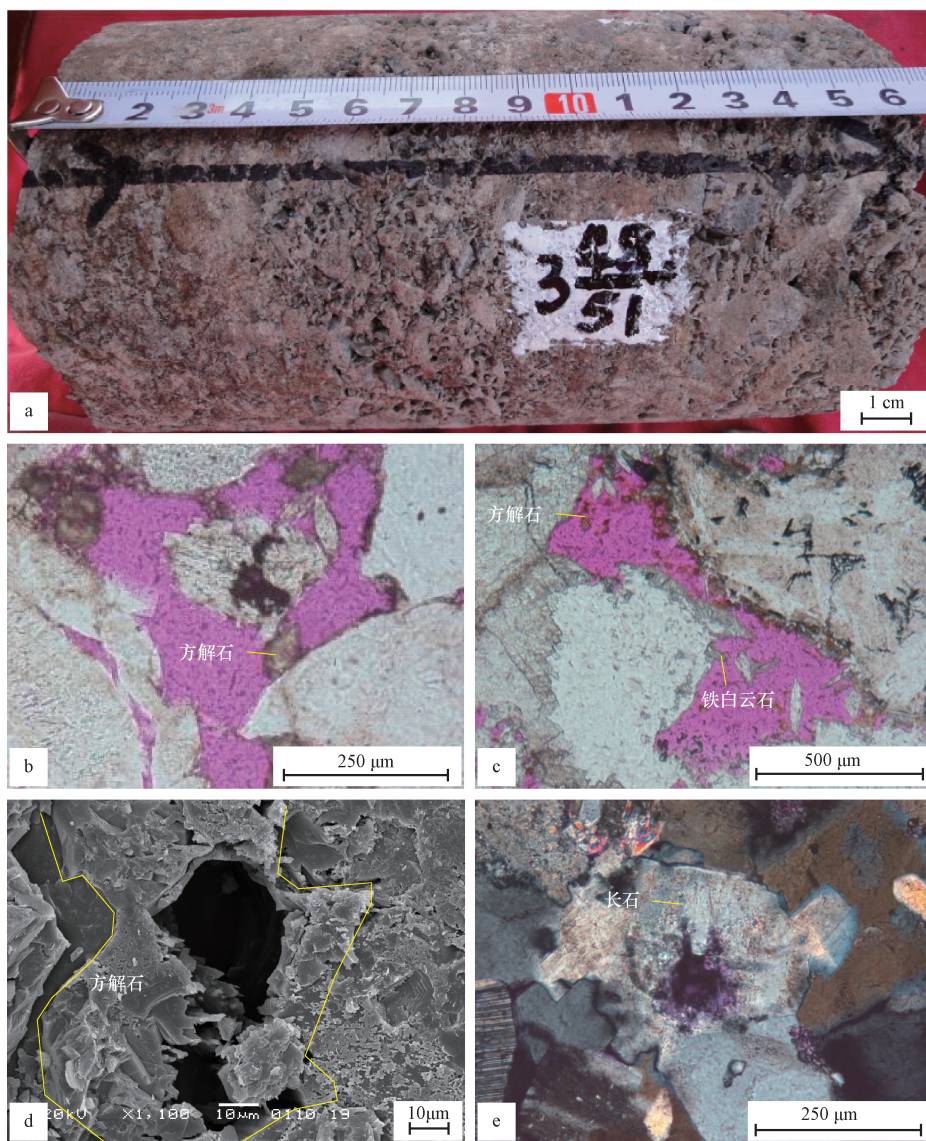


图 9 查干凹陷下白垩统巴音戈壁组储层溶孔特征

Fig. 9 Characteristics of dissolved pores in the Bayingebi Formation of the Lower Cretaceous in the Chagan Sag

a. 样 6-3 井,埋深 $2\ 775.00\ \text{m}$,灰黄色油斑砂砾岩,“黄豆状孔”溶孔不均匀发育;b. 样 2 井,埋深 $2\ 888.37\ \text{m}$, K_1b^2 ,碳酸盐胶结物溶蚀孔;c. 意 2 井,埋深 $2\ 695.45\ \text{m}$,方解石胶结物溶蚀;d. 样 6-1 井,埋深 $2\ 337.55\ \text{m}$,碳酸盐胶结物残余溶蚀孔;e. 毛 11 井,埋深 $3\ 297.26\ \text{m}$,长石溶孔

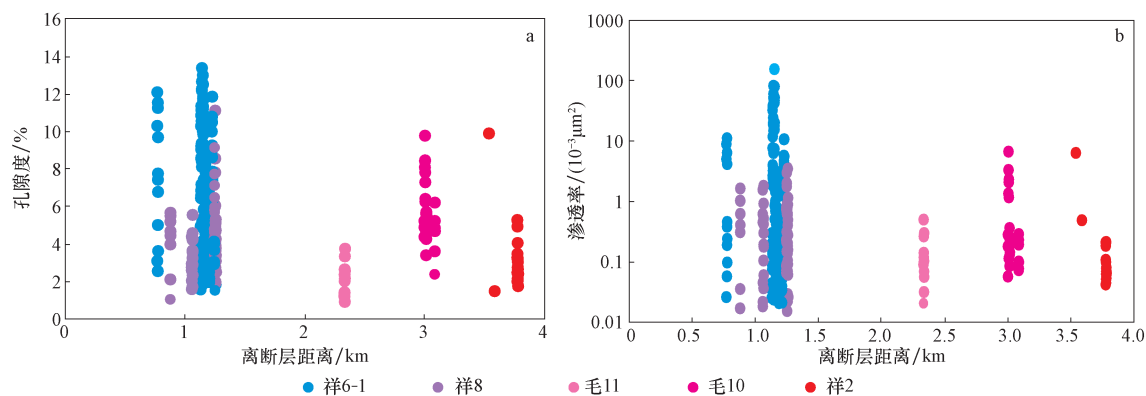


图 10 查干凹陷巴音戈壁组储层物性与离毛西断裂距离的变化关系

Fig. 10 Relationship between the physical properties of reservoirs in the Bayingebi Formation and the distance to the Maoxi fault in the Chagan Sag

a. 孔隙度; b. 渗透率

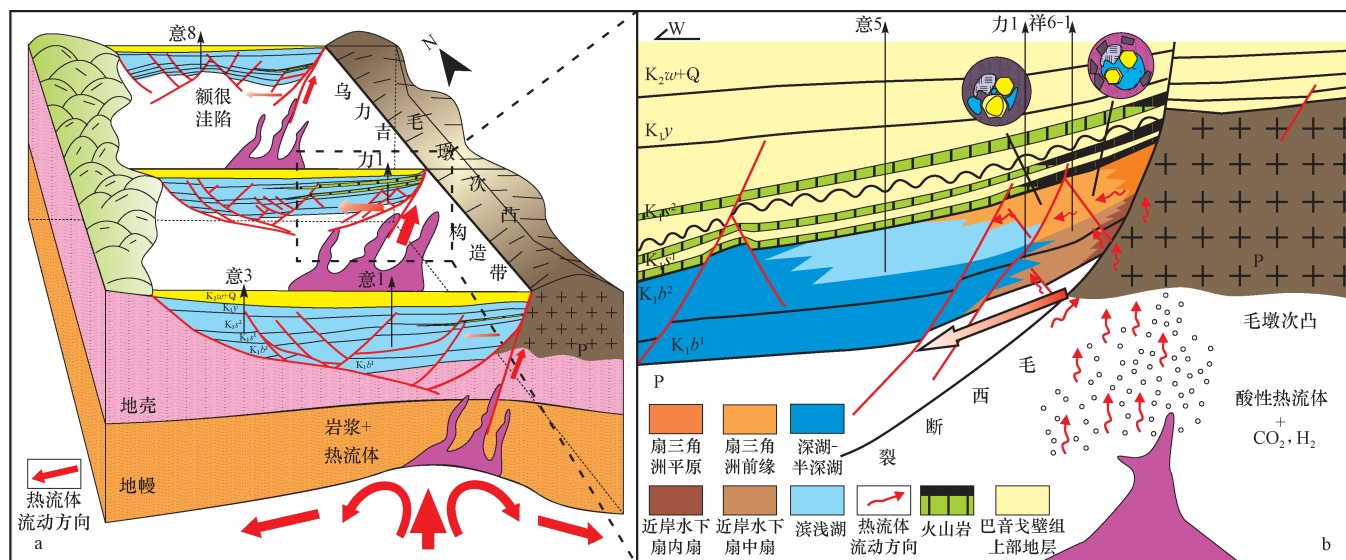


图 11 查干凹陷深部热流体、火山岩平面分布特征(a)和深部热流体发育模式(b)

Fig. 11 Distribution of volcanic rocks (a) and deep thermal fluid development model(b) of the Chagan Sag

酸盐矿物等,形成次生孔隙。此外,随着距离毛西断裂距离增大,热流体影响越小。如图 10 所示,乌力吉构造带巴音戈壁组储层孔隙度和渗透率与毛西断裂之间的距离有着较好的相关性。为了排除岩性对储层物性的影响,图 10 中数据点均来自内含砾砂岩和砂砾岩储层。结果表明,随着距毛西断裂的距离增加,平均孔隙度由距断裂 1 km 的 6% 迅速下降到距断裂 3 km 的 3% 左右;相应地,平均渗透率由 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降低到 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

综上所述,本文建立了热流溶蚀作用的发育模式(图 11)。查干凹陷深部热流携带着 CO_2 等气体,主要沿毛西断裂发生垂向运移,进入乌力吉构造带深部储层;而后沿渗透性好的储集层或不整合面向凹陷中心运移,改造乌力吉构造带储层物性,主要溶蚀储层中碳

酸盐胶结物和长石颗粒等,形成不同等级的溶蚀孔洞。随着横向运移距离的增加,围岩矿物的溶解使热流体的 pH 值增高,对储层物性的改善作用减弱。在热流体活动通道两侧可形成一定范围的溶蚀改造区,成为油气聚集的新场所,是查干凹陷乌力吉构造带下白垩统储层今后勘探的一个重要领域。

4 结论

1) 热流体活动在查干凹陷的乌力吉构造带是客观存在的,主要与早白垩世火山活动密切相关,发生在苏红图期。热流体活动体现在早白垩世大地热流出现异常高值、包裹体均一温度异常增高、碳同位素显示无机成因特征、镜质体反射率突变及粘土矿物转化异常

5个方面。

2) 查干凹陷深部的热流体携带 CO_2 等气体,主要沿毛西断裂上侵,进入乌力吉构造带,通过微裂缝和高渗砂体等通道发生横向运移,酸性热流体主要溶蚀巴音戈壁组储层中碳酸盐和硅铝酸盐等矿物,改善储层物性,形成次生溶孔。

3) 纵向上,查干凹陷热流体主要影响乌力吉构造带巴音戈壁组储层埋深 2 800 m 以下地层,对应着埋深 2 600 ~ 3 100 m 的异常高孔带。横向上,随着距离热流体侵入通道距离的增加,对储层物性的改善作用减弱。深部热流体活动产生的区内异常溶蚀孔洞,可成为油气的主要储集空间。

参 考 文 献

- [1] Hiemstra EJ, Robert H G. Repeated injection of hydrothermal fluids into downdip carbonate: A diagenetic and stratigraphic mechanism for localization of reservoir porosity, Indian Basin Field, New Mexico, USA [C]. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 406(1): 141–177.
- [2] Spycher N, Peiffer L, Sonnenthal E L, et al. Integrated multicomponent solute geothermometry [J]. *Geothermics*, 2014, 51(7): 113–123.
- [3] Simoneit B R T. Petroleum generation, an easy and widespread process in hydrothermal system: An overview [J]. *Applied Geochemistry*, 1990, 5(1/2): 17–28.
- [4] Anderson R N. Sedimentary basin as thermo-chemical reactors [R]. 1990 and 1991 Report of Lamont-Doherty Geologic Observatory, 1992: 68–76.
- [5] 解习农, 成建梅, 孟元林. 沉积盆地流体活动及其成岩响应 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 863–871.
Xie Xinong, Cheng Jianmei, Meng Yuanlin. Basin fluid flow and associated diagenetic processes [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 863–871.
- [6] 时志强, 王毅, 金鑫, 等. 塔里木盆地志留系热液碎屑岩储层: 证据、矿物组合及油气地质意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 903–913.
Shi Zhiqiang, Wang Yi, Jin Xin, et al. The Silurian hydrothermal clastic reservoirs in Tarim Basin: Evidences, mineral assemblages and its petroleum geological implications [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 903–913.
- [7] 熊振, 王良书, 李成, 等. 东营凹陷现代热流场特征及地热异常成因 [J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(4): 38–41.
Xiong Zhen, Wang Shuliang, Li Cheng, et al. Determination and interpretation of the terrestrial heat flow in Dongying depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(4): 38–41.
- [8] 田雷, 崔海峰, 冯晓军, 等. 麦盖提斜坡奥陶系热液溶蚀流体对内幕白云岩储层的改造作用 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 402–408.
Tian Lei, Cui Haifeng, Feng Xiaojun, et al. Reconstruction effect of the Ordovician hydrothermal dissolution fluid on interior dolomite reservoirs in Maigaiti slope, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 402–408.
- [9] 张涛, 苏玉山, 余刚, 等. 热液白云岩发育模式——以扎格罗斯盆地白垩系 A 油田为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 393–401.
Zhang Tao, Su Yushan, She Gang, et al. A study on the genetic model of hydrothermal dolomitization in Taq oilfield, Kurdistan region, Iraq—Taking oilfield A in the Cretaceous in Zagros Basin as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 393–401.
- [10] 龙华山, 向才富, 牛嘉玉, 等. 歧口凹陷滨海断裂带热流体活动及其对油气成藏的影响 [J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 673–684.
Long Huashan, Xiang Caifu, Niu Jiayu, et al. Hydrothermal fluid flow and its influence on the hydrocarbon migration and accumulation along Binhai fault in Qikou sag, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 35(4): 673–684.
- [11] 叶加仁, 杨香华. 沉积盆地热流体活动及其成藏动力学意义 [J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 214–218.
Ye Jiaren, Yang Xianghua. Thermal fluid flow in sedimentary basins and its significance to pool-forming dynamics [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 214–218.
- [12] 于志超, 刘立, 孙晓明, 等. 歧口凹陷古近纪热流体活动的证据及其对储层物性的影响 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(S3): 1–13.
Yu Zhichao, Liu Li, Sun Xiaoming, et al. Evidence of paleogene thermal fluid activities and their impact on porosity-permeability of reservoir in Qikou sag [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(S3): 1–13.
- [13] Hedenquist J W, Henley R W. The important of CO_2 on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition [J]. *Economic Geology*, 1985, 80(5): 1379–1405.
- [14] Sillitoe R H. Gold deposits in Western Pacific island arcs: The magmatic connection [J]. *Economic Geology Monography*, 1989, 6: 274–291.
- [15] 卫平生, 张虎权, 陈启林. 银根—额济纳旗盆地油气地质特征及勘探前景 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Wei Pingsheng, Zhang Huquan, Chen Qilin. Oil and gas geological characteristics and exploration prospect of Yingen-Ejinaqi Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [16] 郭彦如, 李天顺, 高平. 内蒙古银—额盆地火山特征及识别 [J]. *地球学报*, 1999, 20(增刊): 97–102.
Guo Yanru, Li Tianshun, Gao Ping. Volcanic features and recognition of Yin-E Basin in Inner Mongolia [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999, 20(S1): 97–102.
- [17] Wei W, Zhu X M, Tan M X, et al. Diagenetic and porosity evolution of conglomerate sandstones in Bayingebi Formation of the Lower Cretaceous, Chagan Sag [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 998–1012.
- [18] 李聪, 王德仁, 蒋飞虎. 查干凹陷巴音戈壁组沉积演化及有利砂体分布预测 [J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1169–1179.
Li Cong, Wang Deren, Jiang Feihu. The sedimentation evolution and favorable sand body distribution prognosis in Chagan Sag of Bayingebi Formation [J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1169–1179.

- [19] 魏巍,朱筱敏,国殿斌,等. 银-额盆地查干凹陷下白垩统碎屑岩储层成岩作用及对储层物性的影响[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12):1939-1948.
- Wei Wei, Zhu Xiaomin, Guo Dianbin, et al. Diagenesis and its controls on reservoir quality of Lower Cretaceous clastic rock reservoir in Chagan Depression of Yin-E Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12):1939-1948.
- [20] 吴少波,白玉宝,杨友运. 内蒙古银根盆地地下白垩统沉积相[J]. 古地理学报, 2003, 5(1):36-43.
- Wu Shaobo, Bai Yubao, Yang Youyun. Sedimentary facies of the Lower Cretaceous of Yingen Basin in Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(1):36-43.
- [21] 杨国臣,焦大庆,肖斌,等. 内蒙古银额盆地查干凹陷构造-层序-沉积特征盆地原型及其成因机制[J]. 古地理学报, 2013, 15(3):305-316.
- Yang Guochen, Jian Daqing, Xiao Bin, et al. Tectono-sequence-sedimentary characteristics, basin prototypes and their genetic mechanisms in Chagan Sag of Yin-E Basin, Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(3):305-316.
- [22] 郭彦如,于均民,樊太亮. 查干凹陷下白垩统层序地层格架与演化[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(2):166-169.
- Guo Yanru, Yu Junmin, Fan Taiyang. Evolution and sequence stratigraphic framework of Lower Cretaceous in Chagan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(2):166-169.
- [23] 李仁甫,陈清棠,范迎风,等. 内蒙古查干凹陷下白垩统层序地层格架与沉积体系分布[J]. 现代地质, 2009, 23(5):783-790.
- Li Renfu, Chen Qingtang, Fan Yingfeng, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies distribution of the Lower Cretaceous in Chagan Depression, Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2009, 23(5):783-790.
- [24] Zuo Y H, Qiu N S, Chang J, et al. Geothermal regime and source rock thermal evolution in the Chagan Sag, Inner Mongolia, northern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59:245-267.
- [25] 左银辉,马维民,邓已寻,等. 查干凹陷中、新生代热史及烃源岩热演化[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2013, 38(3):553-560.
- Zuo Yin-hui, Ma Weimin, Deng Yixun, et al. Mesozoic and Cenozoic thermal history and source rock thermal evolution history in the Chagan Sag, Inner Mongolia [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(3):553-560.
- [26] 左银辉,邱楠生,邓已寻,等. 查干凹陷大地热流[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9):3038-3050.
- Zuo Yin-hui, Qiu Nansheng, Deng Yixun, et al. Terrestrial heat flow in the Chagan Sag, Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9):3038-3050.
- [27] 左银辉,李新军,孙雨,等. 查干凹陷热史及油气成藏期次[J]. 地质与勘探, 2014, 50(3):583-590.
- Zuo Yin-hui, Li Xinjun, Sun Yu, et al. Thermal history and hydrocarbon accumulation period in the Chagan Sag, Inner Mongolia [J]. Geology and Prospecting, 2014, 50(3):583-590.
- [28] 卢焕章. 包裹体地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1990:1-216.
- Lu Huanzhang. Geochemistry of fluid inclusion [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990:1-216.
- [29] Jansa L F, Noguera Urrea V H. Geology and diagenetic history of overpressured sandstone reservoirs, venture gas field, offshore Nova Scotia, Canada [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10):1640-1658.
- [30] 王大锐. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京:石油工业出版社, 2000:4-20.
- Wang Darui. Stable isotope geochemistry of oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000:4-20.
- [31] Hood A, Gutjahr C C M, Heacock R L. Organic metamorphism and the generation of petroleum [J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6):986-996.
- [32] 肖贤明,刘祖发,申家贵,等. 确定含油气盆地古地温梯度的一种新方法:镜质组反射率梯度法[J]. 科学通报, 1998, 43(21):2340-2343.
- Xiao Xianming, Liu Zufa, Shen Jiagui, et al. A new method to determine paleogeothermal gradient of oil and gas basin: Vitrinite reflectivity gradient method [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(21):2340-2343.
- [33] 胡圣标,汪集斌,张容燕. 利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4):42-45.
- Hu Shengbiao, Wang Jisheng, Zhang Rongyan. Estimation of the amount of uplift and erosion across an unconformity using vitrinite reflectivity data [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4):42-45.
- [34] Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7(2):79-99.
- [35] 王行信,韩守华. 中国含油气盆地砂泥岩粘土矿物的组合类型[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4):1-3.
- Wang Xingxin, Han Shouhua. The combination pattern of clay minerals of sandstone and mud rock in China's petroliferous basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4):1-3.

(编辑 李 军)