

辽河盆地西部凹陷古潜山天然裂缝特征及其影响因素

刘国平^{1,2},董少群^{1,2,3},李洪楠⁴,彭仕宓^{1,2},管聪^{1,2},毛哲^{1,2}

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

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 3. 中国石油大学(北京)理学院,北京 102249;

4. 中国石油辽河油田勘探开发研究院,辽宁 盘锦 124010]

摘要:古潜山储层是辽河盆地西部凹陷油气勘探的重要领域,天然裂缝发育的非均质性是影响古潜山储层油气富集和单井产能的主要因素之一。通过相似野外露头、岩心、薄片、扫描电镜和成像测井等资料分析,对辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝类型和发育特征进行了研究,并讨论了影响古潜山储层天然裂缝发育的主要因素。辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝按照地质成因可以划分为构造裂缝、风化裂缝和溶蚀裂缝。构造裂缝是天然裂缝的主要类型,其发育的优势方位为 NNE-SSW 向。铸体薄片和扫描电镜等资料分析表明古潜山储层中发育有矿物晶间缝、解理缝、裂纹缝和破碎缝。其中矿物破碎缝的开度和规模较大,开度通常分布在 20~40 μm ,规模不受矿物颗粒的限制。古潜山储层天然裂缝发育的非均质性主要受构造运动、岩性和成岩作用的控制。加里东运动、印支运动和燕山运动是天然裂缝形成的主要时期;古潜山储层变质岩中的花岗岩类、碳酸盐岩中的白云岩以及火山岩中的中酸性岩石为天然裂缝发育的优势岩性;成岩作用中表生风化作用、溶蚀作用和变质作用是天然裂缝发育的建设性作用,而充填作用和交代蚀变作用属于破坏性作用。研究成果为辽河盆地西部凹陷古潜山储层油气藏的勘探开发提供了科学的地质依据。

关键词:天然裂缝;控制因素;古潜山;西部凹陷;辽河盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics of natural fractures and their influencing factors in the paleo-buried-hill reservoirs of the Western Sag in the Liaohe Basin, China

Liu Guoping^{1,2}, Dong Shaoqun^{1,2,3}, Li Hongnan⁴, Peng Shimí^{1,2}, Guan Cong^{1,2}, Mao Zhe^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

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

3. College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

4. Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China]

Abstract: The paleo-buried-hill reservoirs are important targets for hydrocarbon exploration in the Western Sag of Liaohe Basin, China. The heterogeneity in natural fracture development is one of the main factors affecting the hydrocarbon enrichment and single well productivity in the area. Based on the analysis of analogous outcrops, drilling cores, thin sections, scanning electron microscopy (SEM) and image logging data, we study the types and developmental characteristics of natural fractures therein, and discuss the main factors affecting the development of natural fractures in the area. According to the geological genesis, natural fractures in these buried hills can be divided into 3 groups, namely tectonic, weathering, and dissolution fractures with the dominant orientation of NNE-SSW strikes. Thin section and SEM observation indicates that mineral intercrystalline fractures, cleavage fractures, cracks and mechanical fractures were developed in these reservoirs. Among others, mineral intercrystalline fractures have the largest aperture and scale with an aperture of 20-40 μm and the scale unlimited by mineral particles. The heterogeneity of natural fractures is controlled by tectonic movements, lithology, and diagenesis of the paleo-buried-hill reservoirs. The Caledonian, Indosinian and Yanshan movements are the main periods of natural fracture development. The granitoids in the metamorphic rocks, dolomites in

收稿日期:2019-07-20;修订日期:2020-04-07。

第一作者简介:刘国平(1989—),男,博士研究生,非常规储层裂缝形成、分布及预测。E-mail:liugp1228@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05009001);中央高校基本科研业务费专项(2462020YJRC005)。

the carbonate rocks and medium-acid rocks in the volcanic rocks are advantageous to the development of natural fractures. The supergene weathering, dissolution, and metamorphism are the constructive diageneses for natural fracture development, while the filling and metasomatic dissolution are the destructive ones. The results provide a sound geological basis for the exploration and development of the paleo-buried-hill reservoirs in the Western Sag of Liaohe Basin.

Key words: natural fracture, controlling factor, buried hill, Western Sag, Liaohe Basin

古潜山油气藏是一类特殊类型的重要油气藏,其储层多与盆地上覆地层不整合接触,并经历了长时间的风化和剥蚀,主要特征表现为储层岩石厚度大,孔隙度和渗透率非均质性强,储集空间类型复杂多样^[1-3]。古潜山储层岩性不仅包括变质岩和火山岩,还包括了碳酸盐岩和砂岩,油气藏的烃源岩大部分发育于不整合面上较新的沉积物中。古潜山油气藏不仅可以形成于潜山顶部的风化壳中,也可以分布在潜山内幕中。由于古潜山储层经历了多期构造和成岩作用的叠加,储层中次生孔隙和天然裂缝较发育,属于典型的裂缝性油气藏^[4-6]。

辽河盆地古潜山储层勘探开发较早,古潜山油气藏占有辽河油田相当比例的储量和产量,是主要的油气勘探领域^[1,7]。西部凹陷古潜山储层作为辽河盆地重要的油气勘探区带,已经发现了兴隆台、齐家、曙光、杜家台等重要的潜山油气藏。西部凹陷古潜山油气藏呈块状分布,潜山岩性以变质岩为主,同时包含了碳酸盐岩和火山岩。古潜山储层中天然裂缝发育,是其主要的油气储集空间和渗流通道。由于经历了长期复杂的地质演变,古潜山储层中天然裂缝类型多样,规模相差悬殊,空间分布变化大,非均质性强^[8-11]。勘探开发实践表明古潜山储层不同层段油气显示受天然裂缝类型和发育程度的控制明显^[8,12-14]。因此,针对辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝类型、发育特征和影响因素的研究显得尤为重要。

本次研究利用该地区的野外露头剖面、岩心、薄片、扫描电镜和成像测井等资料,并结合前人的研究成果剖析了辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝的类型和发育特征,并从构造运动、岩性和成岩作用三方面讨论了影响古潜山储层天然裂缝发育的主要因素。以期该研究成果为辽河盆地西部凹陷古潜山储层油气藏的勘探开发提供科学的地质依据。

1 地质概况

辽河盆地位于中国东北部,呈 NS-SW 向展布,是中生代以来在拉伸应力场作用下形成的裂陷盆地(图1)。辽河盆地根据其典型的构造特征可以划分为

6个一级构造单元,分别为大民屯凹陷、西部凹陷、东部凹陷、西部凸起、中央凸起和东部凸起,面积约 12 400 km²。盆地自中生代以来经历了多期强烈的构造运动,发育北北东到北东向和北西到近东西向两组基底断裂系统^[15-16]。这些断裂不仅控制了盆地的构造形态,同时控制了盆地的构造演化和沉积充填历史,将盆地基岩切割成多个垒堑相间的断块。

盆地的构造演化为基底隆起形成古潜山创造了良好的地质条件,形成了多种类型、广泛发育的基底潜山,主要包括太古宙及古元古代变质岩潜山、中-新元古代和早古生代碳酸盐岩潜山、以及中生代火山岩潜山。由于经历了多期构造抬升和变形,大面积古潜山地层遭受了复杂的剥蚀、风化和淋滤等作用,形成了孔、缝、洞以及原生孔隙在内的多种类型共同发育的储集空间网络^[7,13,17]。辽河盆地西部凹陷地层结构特征复杂,不同构造层可以出现相互接触。同时新生代地層不整合覆盖在下伏基岩隆起构造之上,巨厚的暗色泥岩和油页岩为油气藏的形成提供了有力的物质基础,而新生代断裂的长期活动为油气的运移提供了良好的通道,有利于基岩古潜山油气藏的形成^[16,18]。辽河盆地西部凹陷古潜山储层孔隙度在 1%~20% 变化,基质渗透率一般较低,小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,表明储层物性非均质性较强^[19-22]。

2 天然裂缝类型及特征

辽河盆地西部凹陷古潜山储层在漫长的地质历史时期经历了构造破碎、风化剥蚀、溶蚀淋滤和变质重结晶等复杂多样的地质作用,储集空间发育程度较高且类型多样,可以划分为天然裂缝和溶蚀孔洞两大类。天然裂缝是辽河盆地西部凹陷古潜山储层的主要储集空间类型,占整个储集空间的 40%~50%^[23-26]。按照地质成因,古潜山储层中的天然裂缝可以分为构造裂缝、风化裂缝和溶蚀裂缝,其中构造裂缝是主要的类型^[16,26-39]。

构造裂缝在辽河盆地西部凹陷古潜山中分布广泛,本次研究通过相似露头区野外调查、岩心观察、成像测井解释、薄片及扫描电镜分析对研究区构造裂缝

进行了研究。野外调查选取了位于辽河盆地西部凹陷,与古潜山储层具有相似岩性和相同构造演化史的 石山作为露头观测区。野外露头中构造裂缝的规模从几十厘米到几米不等,不同期次的构造裂缝相互切割限制(图 2a)。露头 and 成像测井观测统计表明古潜山储层构造裂缝主要发育有 3 个组系,分别为 NNE – SSW 向、NW – SE 向和近 E – W 向,其中 NNE – SSW 向,是研究区目的层构造裂缝的优势发育方位(图 3)。岩心观察统计分析发现辽河盆地西部凹陷古潜山构造裂缝倾角多分布在 $50^{\circ} \sim 90^{\circ}$,其中 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的高角度

裂缝最为发育, $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 的斜交裂缝次之(图 4)。岩心上构造裂缝密度分布范围较广,1 ~ 15 条/m 不等,一些网状缝密度可达每米几十条(图 2b)。构造裂缝开度差别较大,一般分布在 0.1 ~ 1.5 mm。岩心和成像测井资料统计分析发现构造裂缝的规模多小于 25 cm,规模较大的裂缝发育较少。

岩心和成像测井资料显示构造裂缝多为没有被矿物充填的有效裂缝,只有小于 25% 的构造裂缝被石英、方解石和绿泥石等矿物半充填或全充填。成像测井显示没有被矿物充填的高导缝呈深色(低电阻)正

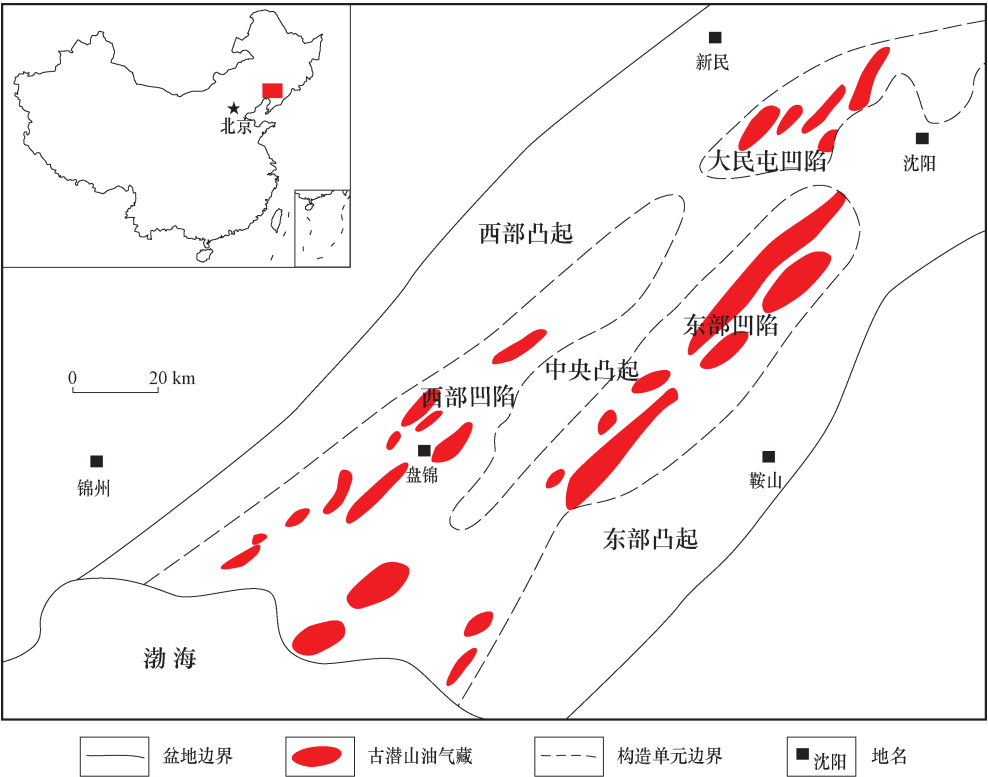


图 1 辽河盆地构造位置(a)及古潜山油气藏分布(b) (据单俊峰^[30]修改)

Fig. 1 The structural location(a) and distribution(b) of paleo-buried-hill reservoirs in the Liaohe Basin (modified after Shan Junfeng^[30])

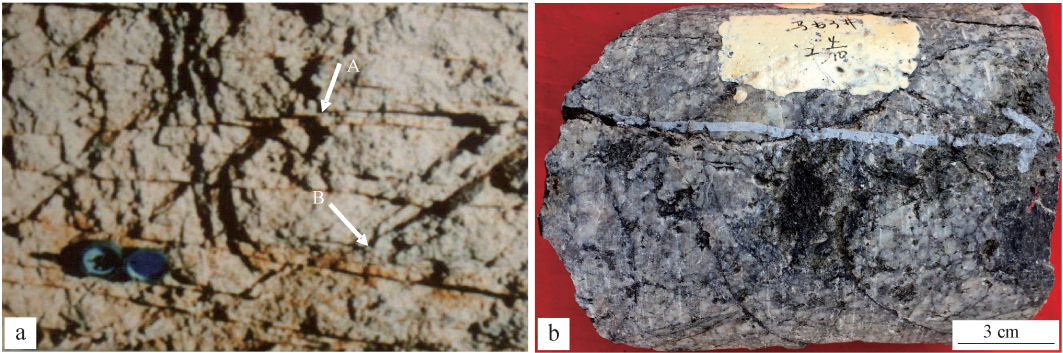


图 2 辽河盆地西部凹陷古潜山中的天然裂缝

Fig. 2 Natural fractures in the paleo-buried-hill of the Western Sag in the Liaohe Basin

a. 不同期次构造裂缝相互切割限制;b. 马古 3 井,埋深 4 186.79 m,构造裂缝相互交织成网状

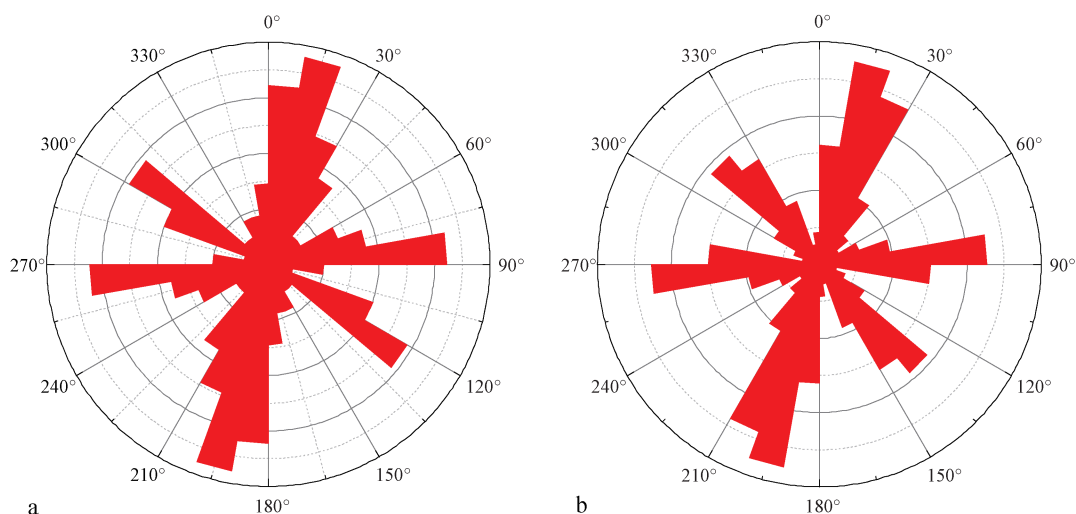


图3 辽河盆地西部凹陷古潜山中天然裂缝走向

Fig. 3 The strike of natural fractures in the paleo-buried-hill of the Western Sag in the Liaohe Basin

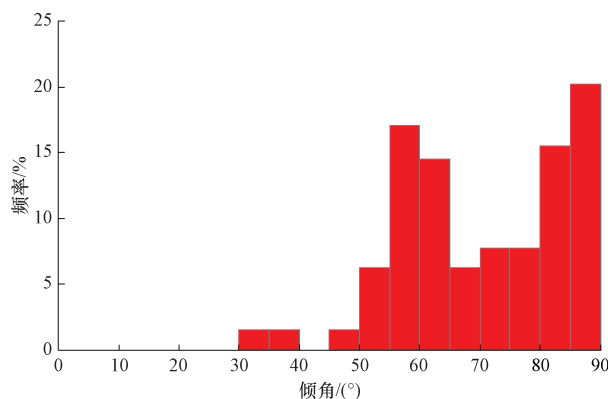
a. 露头中构造裂缝走向玫瑰花图($n=261$); b. 成像测井中构造裂缝走向玫瑰花图($n=610$)图4 辽河盆地西部凹陷古潜山储层岩心构造裂缝
倾角分布频率直方图

Fig. 4 Frequency histogram of tectonic fracture dip angle in cores of paleo-buried-hill reservoirs in the Western Sag of Liaohe Basin

弦曲线,这是充填泥浆滤液或低阻矿物造成的,为有效裂缝。而高阻缝为浅色或白色(相对高阻)正弦曲线,是由裂缝中充填的如方解石、石英等高阻矿物引起,为无效裂缝(图5)。通过对比不同井岩心及成像测井资料的裂缝解释结果发现,构造裂缝的发育程度和潜山构造部位有一定的关系,不同构造部位裂缝发育程度存在一定差异^[31]。例如,构造裂缝发育程度与距断层面距离成反比,断层带附近裂缝发育程度较远离断层区域明显高。此外,构造裂缝发育段除了沿断层分布外,潜山构造高部位转折端也是构造裂缝的有利发育区^[32]。

通过铸体薄片和扫描电镜等资料的分析发现,辽河盆地西部凹陷古潜山储层主要发育有矿物晶间缝、矿物解理缝、矿物裂纹缝和矿物破碎缝。主要特征如

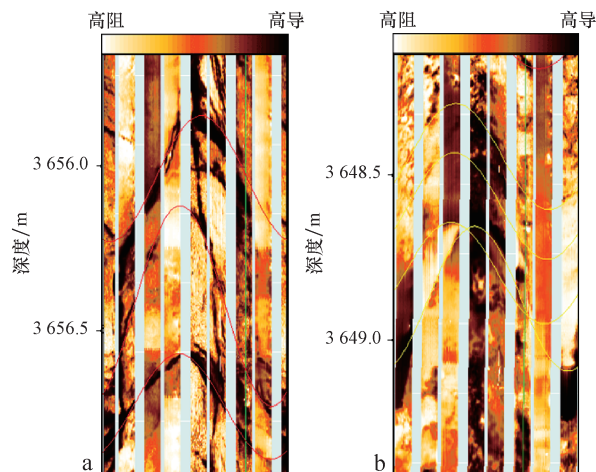


图5 辽河盆地西部凹陷兴古7井成像测井资料中的构造裂缝

Fig. 5 Tectonic fractures detected by image logging in

Well Xinggu 7 in the Western Sag of Liaohe Basin

a. 红色曲线代表没有被矿物充填的有效裂缝;

b. 黄色曲线代表被矿物充填的无效裂缝

下:①矿物晶间缝:发育在组成岩石的矿物晶体之间或边缘,并有可能穿过矿物晶体的裂缝(图6a)。②矿物解理缝:由于受到构造挤压和成岩压实的应力作用,沿矿物晶体的解理张开形成的裂缝。研究区古潜山储层中最常见的是长石解理缝,其次为角闪石、黑云母等矿物的解理缝(图6b)。③矿物裂纹缝:在刚性矿物颗粒内部无规则发育的裂缝。古潜山储层中这类裂缝主要发育在石英、长石等矿物颗粒中(图6c)。④矿物破碎缝:穿过一个或多个矿物颗粒或沿着其边缘发育的裂缝(图6d)。不同种类天然裂缝开度具有明显的差异。矿物晶间缝开度最小,通常小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。矿物解理缝与矿物裂纹缝开度次之,一般小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。矿物破

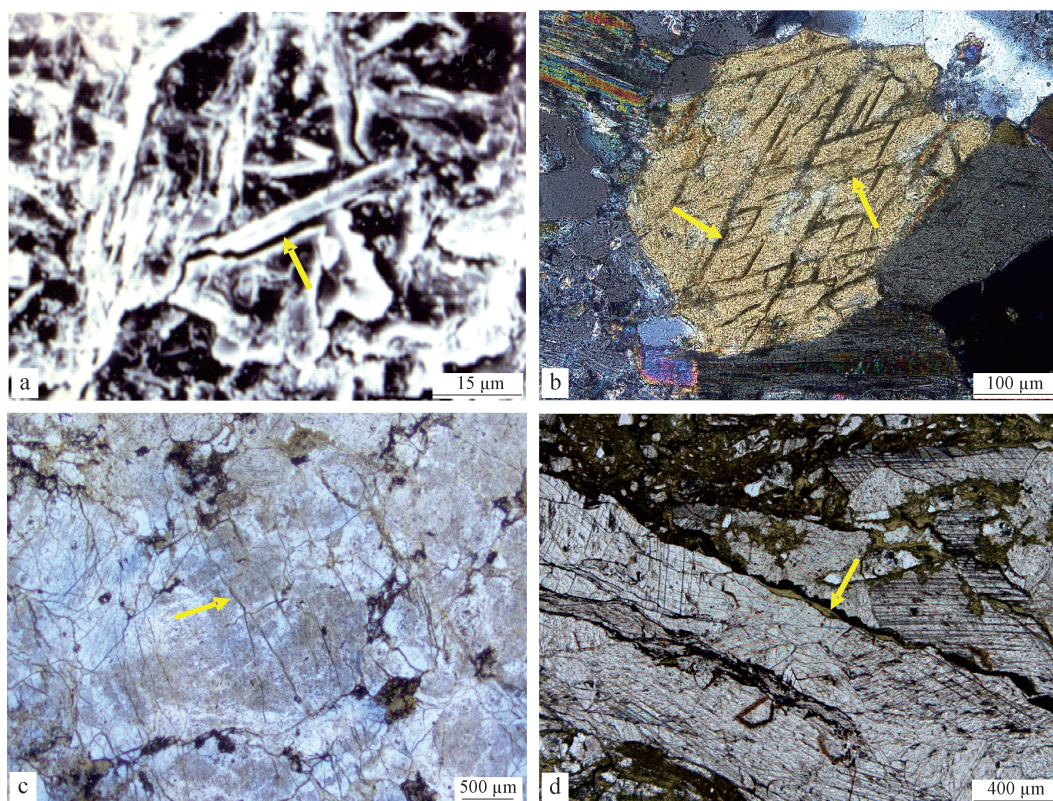


图6 辽河盆地西部凹陷古潜山储层中的天然裂缝

Fig. 6 Natural fractures in the paleo-buried-hill reservoirs in the Western Sag of Liaohe Basin

a. 矿物晶间缝, 齐古2井, 埋深1 931.60 m; b. 矿物解理缝, 齐古6井, 埋深2 621.6 m;
c. 矿物裂纹缝, 安130井, 埋深2 781.54 m; d. 矿物破碎缝, 胜11-7井, 埋深2 814.88 m

碎缝开度较大,通常分布在 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 。显微镜下裂缝面密度差异较大,分布范围介于 $0.3 \sim 7.6 \text{ mm/mm}^2$ 。矿物解理缝和矿物裂纹缝受矿物颗粒大小的限制,规模较小。而矿物破碎缝发育在颗粒间或颗粒边缘,不受矿物颗粒的限制,规模较大。显微镜下的裂缝多是没有被矿物充填的有效裂缝,充填裂缝的比例小于30%,充填矿物主要是碳酸盐和粘土矿物。

由于辽河盆地西部凹陷古潜山构造和岩性的特殊性,风化裂缝和溶蚀裂缝的发育也具有明显的特征。风化裂缝主要是指古潜山地层在地表或接近地表的风化剥蚀阶段,岩石在受到物理、化学和生物风化作用等风化营力的作用下形成的裂缝。这类与表生作用和风化作用有关的风化裂缝主要发育在的风化壳中,与溶蚀孔隙共生。辽河盆地西部凹陷潜山顶部普遍发育风化壳。钻井资料表明潜山风化裂缝发育厚度一般可达几十米,发育程度从风化壳顶部向下逐渐降低。风化裂缝的形成无明显的方向性,常密集均匀的分布,规模较小,互相连通形成良好的裂缝网络。溶蚀裂缝主要是指受早期构造应力作用形成的构造裂缝在后生成岩阶段,受地下水作用的溶蚀改造形成的一种成岩裂缝。早期裂缝受到溶蚀改造后开度变大,裂缝壁形态不规

则,具有明显的溶蚀特征,这类裂缝多发育在碳酸盐岩潜山储层中。在辽河盆地西部凹陷古潜山中,溶蚀裂缝纵向上主要发育在古潜水面附近的潜流带中,总体发育程度较低。

3 天然裂缝影响因素

辽河盆地西部凹陷古潜山储层形成时间较早,后期经历了多期、复杂的地质作用,天然裂缝的分布具有很强的非均质性。依据岩心标定测井、测井解释裂缝发育段特征,并结合多种资料分析,认为辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝发育主要受构造运动、岩性和成岩作用的控制^[33-36]。

3.1 构造运动

辽河盆地西部凹陷古潜山储层经历了由构造运动控制的一个长期而复杂的地质演化过程。如前所述,古潜山储层岩性为太古宙变质岩、元古宙碳酸盐岩和中生代中-基性火山岩,储层岩石经历了多次大的构造运动和长期的、多期的地表风化、淋滤作用,形成了以天然裂缝、溶洞和溶孔为主的复杂多样的储集空

间体系^[37-43]。以太古宙变质岩为例,其储集空间的形成和演化经历了 6 个主要时期:即太古宙变质岩形成期、第一风化剥蚀期、前埋藏期、第二风化剥蚀期、表生风化剥蚀期和后埋藏期(图 7)。自太古宙至白垩纪末期,储集空间中裂缝的演化整体呈增大的趋势,其中震旦纪(第二风化剥蚀期)经历的加里东运动和印支运动,以及侏罗纪至白垩纪(表生风化剥蚀期)经历的燕山运动,为天然裂缝形成的主要时期。其次为前震旦纪(第一风化剥蚀期)经历的吕梁运动,也是天然裂缝形成的重要时期。多期次发育的裂缝形成了明显的次生孔隙发育带,是辽河盆地西部凹陷古潜山储层的主要储集空间。

3.2 岩性

岩性对辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝的

影响主要是指不同类型的岩性以及同一种岩性中不同类型的岩石,其物理性质包括密度、构造、成分、硬度等差别较大,导致岩石的力学性质、破裂方式和破裂程度具有明显的差异,因此不同岩性天然裂缝的发育程度也有较大差异^[33]。变质岩潜山中花岗岩类石英和长石含量高,岩石脆性较大,在相同应力作用下易发生破碎,天然裂缝发育。如花岗糜棱岩岩心中构造裂缝的平均线密度可达到 80 条/m,而在角闪岩中天然裂缝发育程度较低,岩心中构造裂缝的平均线密度只有 5 条/m。碳酸盐岩潜山储层中,白云岩构造裂缝发育程度最大,岩心中构造裂缝平均线密度为 10.8 条/m,其次是石灰岩为 4.6 条/m,泥岩中构造裂缝发育程度较差,平均线密度小于 2 条/m。主要是因为白云岩中白云石等脆性矿物含量较高,在相同的应力条件下要比脆性矿物含量低的石灰岩和泥岩更容易发育构造裂

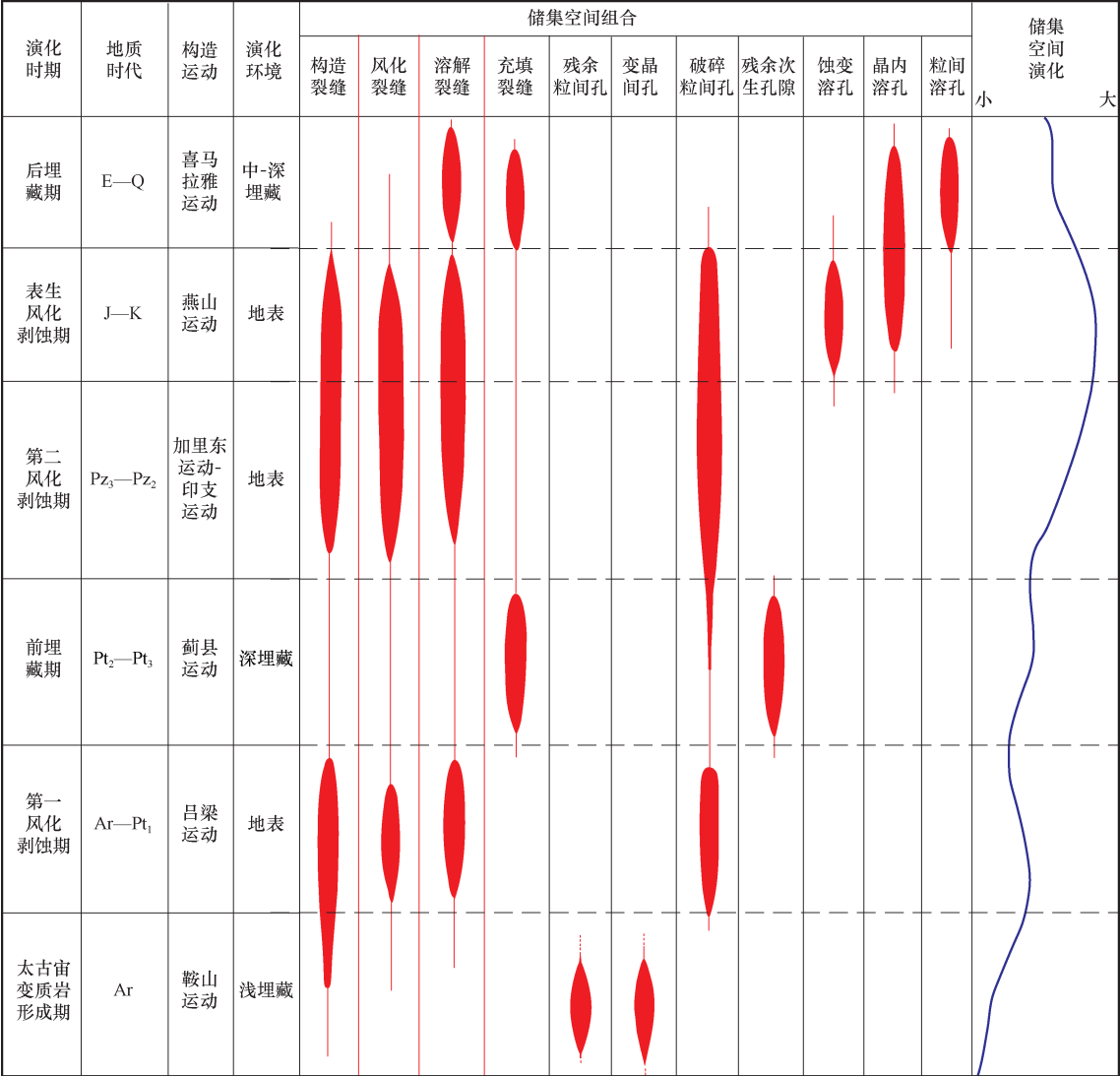


图 7 辽河盆地西部凹陷构造运动对古潜山主要储集空间演化的影响
Fig. 7 The impact of tectonic movements on the reservoir space evolution of paleo-buried-hill reservoirs in the Western Sag of Liaohe Basin

缝。火山岩潜山储层中,中酸性火山岩由于脆性矿物(比如石英)含量高,天然裂缝较发育。如安山岩和粗安岩中石英晶屑较干净明亮,蚀变、破碎强烈,岩心中构造裂缝平均线密度达到 4.2 条/m。基性和超基性火山岩中由于脆性矿物含量较低,天然裂缝发育程度较低,岩心中的平均线密度小于 0.6 条/m。同时,对比不同的潜山类型发现变质岩潜山天然裂缝最为发育,其次是碳酸盐岩潜山,火山岩潜山天然裂缝发育程度相对较差。

3.3 成岩作用

成岩作用是影响辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝发育的重要因素。研究区目的层经历的主要成岩作用包括表生风化作用、溶蚀作用、变质作用、充填作用以及交代蚀变作用。表生风化作用是指古潜山储层大部分曾长期暴露在陆表,经受了巨大的外营力地质改造,形成了区域性的古风化壳。在这种古风化壳中风化裂缝和孔洞极其发育,是古潜山中良好的油气储层。古潜山储层成岩后的溶蚀作用主要包括地表淋滤、埋藏溶解和蚀变作用。活泼的水化学条件不但使岩石中的可溶性矿物溶解,而且也使不溶性矿物蚀变后发生溶解。矿物溶解、蚀变可以形成典型的溶解裂缝,对古潜山储层储集空间的改善具有积极的意义。此外,薄片鉴定中发现研究区溶解裂缝均具有二世代特征,如沿着早期构造裂缝形成的溶蚀孔隙或溶解裂缝。变质作用对天然裂缝的形成具有明显的促进作用,如区域混合化作用形成的变质岩更易于在后期构造运动中发育构造裂缝,动力变质作用有利于形成矿物破碎缝。充填作用是指古潜山储层中早期形成的裂缝在后期成岩演化过程中被不同程度的胶结充填,对于基岩储层天然裂缝的保存具有很强的破坏性作用。交代蚀变作用是指矿物受到热液作用等使原岩的结构、构造以及成分相应地发生改变生成新的矿物组合的过程。古潜山储层暗色矿物等在成岩过程中的交代蚀变会堵塞先期形成的裂缝。

不同类型的成岩作用对辽河盆地西部凹陷古潜山储层天然裂缝的影响作用差别较大,按照对天然裂缝形成的贡献可以将古潜山储层的成岩作用分为建设性作用和破坏性作用两种。其中,表生风化作用和溶蚀作用为建设性成岩作用,如表生风化剥蚀期及第二风化剥蚀期的风化作用在风化壳生成大量的风化裂缝,溶蚀作用有利于形成溶解裂缝,对裂缝的溶蚀更增加了其连通和渗透能力。其次是变质作用,虽然不利于原生孔隙的保存,但对于次生天然裂缝的形成也是有

表 1 辽河盆地西部凹陷古潜山储层成岩作用及其对天然裂缝的影响

Table 1 The diagenesis and its effect on natural fractures in the paleo-buried-hill reservoirs in the Western Sag of Liaohe Basin

影响因素	作用类型		作用效果
建设性因素	溶蚀作用	表生风化作用	地表物理、化学、生物风化作用形成风化残积和坡积物,发育风化裂缝
		地表淋滤	地表水淋滤形成溶蚀裂缝
		埋藏溶解	埋藏期上覆古近系酸性孔隙水溶解形成溶蚀裂缝
		蚀变作用	蚀变矿物溶解形成溶蚀裂缝
	变质作用	多种复杂的变质作用使岩石更易于发育天然裂缝	
破坏性因素	充填作用	方解石、绿泥石、硅质、沸石和铁泥质的充填,使早期形成的天然裂缝有效性变差	
	交代蚀变作用	交代蚀变产生的新蚀变矿物易于堵塞先期形成的裂缝	

利的,因此变质作用也是建设性成岩作用。而充填作用和交代蚀变作用会使得早期形成的天然裂缝被充填或堵塞,使天然裂缝损失或有效性变差,属于破坏性成岩作用(表 1)。

4 结论

- 1) 天然裂缝在辽河盆地西部凹陷古潜山储层广泛发育,按照天然裂缝的地质成因可以将其划分为构造裂缝、风化裂缝和溶蚀裂缝,其中构造裂缝是古潜山储层天然裂缝的主要类型。构造裂缝优势方位为 NNE - SSW 向,以高角度缝和斜交缝为主,裂缝规模和密度变化较大,裂缝多为没有被矿物充填的有效裂缝。
- 2) 铸体薄片和扫描电镜等资料表明辽河盆地西部凹陷古潜山储层中发育有矿物晶间缝、解理缝、裂纹缝和破碎缝。其中矿物晶间缝开度最小,矿物解理缝与矿物裂纹缝开度次之,矿物破碎缝开度较大,分布在 20 ~ 40 μm。矿物解理缝和矿物裂纹缝受颗粒限制,规模较小,而矿物破碎缝规模相对较大。
- 3) 古潜山储层天然裂缝发育的非均质性主要受构造运动、岩性和成岩作用的控制。加里东运动、印支运动和燕山运动是天然裂缝形成的主要时期;古潜山储层变质岩中的花岗岩类、碳酸盐岩中的白云岩以及火山岩中的中 - 酸性岩石为天然裂缝发育的优势岩性,是古潜山的主要储集层;成岩作用中表生风化作用、溶蚀作用以及变质作用是天然裂缝发育的建设性作用,而充填作用和交代蚀变作用属于破坏性作用。

参考文献

- [1] Luo A L, Morad S, Liang Z G, et al. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohe basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(10): 1319–1346.
- [2] Zhao X Z, Jin F M, Wang Q, et al. paleo-Buried-hill play, Jizhong subbasin, Bohai Bay basin: A review and future prospectivity[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(1): 1–26.
- [3] Guo P, Lei L H, Ren D S. Simulation of three-dimensional tectonic stress fields and quantitative prediction of tectonic fracture within the Damintun Depression, Liaohe Basin, northeast China[J]. Journal of Structural Geology, 2016, 86: 211–223.
- [4] Krishna K S. Structure and evolution of the Afanasy Nikitin seamount, buried hills and 85°E Ridge in the northeastern Indian Ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 209(3–4): 379–394.
- [5] Tong K, Zhao C, Lü Z, et al. Reservoir evaluation and fracture characterization of the metamorphic buried hill reservoir in Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 62–69.
- [6] Wang J, Zhao L, Zhang X, et al. Buried hill karst reservoirs and their controls on productivity: Petroleum Exploration and Development[J]. 2015, 42(6): 852–860.
- [7] 吴智勇, 郭建华, 吴东胜. 大民屯凹陷静安堡西侧低潜山变质岩储层裂缝发育特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 322–325.
Wu Zhiyong, Guo Jianhua, Wu Dongsheng. Fractured characteristics of metamorphic reservoirs in low paleo-buried-hill in west of Jing'anpu, Damintun Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 322–325.
- [8] 张吉昌. 辽河盆地古潜山油藏储层特征[J]. 特种油气藏, 2002, 9(5): 30–33.
Zhang Jichang. Buried hill reservoir characteristics of Liaohe Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2002, 9(5): 30–33.
- [9] Hood S D, Nelson C S, Kamp P J J. Modification of fracture porosity by multiphase vein mineralization in an Oligocene nontropical carbonate reservoir, Taranaki Basin, New Zealand[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87: 1575–1597.
- [10] Laubach S E, Reed R M, Olson J E. Coevolution of crack seal texture and fracture porosity in sedimentary rocks: cathodoluminescence observations of regional fractures[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(5): 967–982.
- [11] Gale J F, Lander R H, Reed R M, et al. Modeling fracture porosity evolution in dolostone[J]. Journal of structural Geology, 2010, 32(9): 1201–1211.
- [12] 孟卫工, 李晓光, 刘宝鸿. 辽河坳陷变质岩古潜山内幕油藏形成主控因素分析[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 584–589.
Meng Weigong, Li Xiaoguang, Liu Baohong. Main factors controlling the formation of interior reservoirs in the metamorphic palaeo-buried hills of the Liaohe Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(5): 584–589.
- [13] Luo J, S Morad, Z Liang, et al. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohe basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(10): 1319–1346.
- [14] 张占文, 陈振岩, 郭克圆, 等. 辽河盆地天然气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2002, 20–110.
Zhang Zhanwen, Chen Zhenyan, Guo Keyuan, et al. Gas geology in Liaohe Basin[M]. Beijing: Geology Press, 2002, 20–110.
- [15] 张庆龙, 葛荣峰, 赵立文, 等. 辽河盆地中部构造演化与古潜山油气成藏模式[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 211–217.
Zhang Qinglong, Ge Rongfeng, Zhao Liwen, et al. Structural evolution and model of hydrocarbon accumulation in buried hills in the central Liaohe basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 211–217.
- [16] 谢文彦, 孟卫工, 张占文, 等. 辽河坳陷潜山内幕多期裂缝油藏成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 649–652.
Xie Wenyan, Meng Weigong, Zhang Zhanwen, et al. Formation model of multi-stage fracture reservoirs inside the buried hills in Liaohe Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 649–652.
- [17] 孙立勋. 兴古潜山变质岩油藏储层特征研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(5): 62–64.
Sun Lixun. Study on Reservoir Characteristics of metamorphic rock reservoir in Xinggu Buried Hill[J]. Journal of Yangtze University, 2011, 8(5): 62–64.
- [18] 高先志, 吴伟涛, 卢学军, 等. 冀中坳陷潜山内幕油气藏的多样性与成藏控制因素[J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(3): 31–35.
Gao Xianzhi, Wu Weitao, Lu Xuejun, et al. Multiplicity of hydrocarbon reservoir and accumulation controlling factors within buried hills in Jizhong depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(3): 31–35.
- [19] 王学军, 陈钢花, 张家震, 等. 古潜山油藏裂缝性储层的测井评价[J]. 石油大学学报, 2003, 27(5): 25–27.
Wang Xuejun, Chen Ganghua, Zhang Jiazhen, et al. Logging evaluation of fractured reservoirs in buried hills[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2003, 27(5): 25–27.
- [20] Zeng Lianbo, Su Hui, Tang Xiaomei, et al. Fractured tight sandstone reservoirs: A new play type in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(3): 363–377.
- [21] Dragana T M, Glenn L, David G, et al. Identifying vertical productive fractures in the Narraway gas field using the envelope of seismic anisotropy[C]//SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting, 2004: 135–138.
- [22] Wang Shangxu, Li Xiangyang. Fracture detection using 3D seismic data: A physical modeling study[C]//SEG Int'l Exposition and 73th Annual Meeting, 2003: 2303–2306.
- [23] 张亚范, 邢志贵, 杜韞华, 等. 中国油气储层研究图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
Zhang Yafan, Xing Zhigui, Du Wenhua, et al. Atlas of China's oil and gas reservoir research[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [24] 赵澄林, 刘孟慧, 胡爱梅, 等. 特殊油气储层[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
Zhao Chenglin, Liu Menghui, Hu Aiqiang, et al. Special oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [25] 赵澄林, 孟卫工, 金春爽, 等. 辽河盆地火山岩与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
Zhao Chenglin, Meng Weigong, Jin Chunshuang, et al. Volcanic rocks and oil and gas in Liaohe Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry

- Press, 1999.
- [26] 曾联波, 张吉昌. 辽河坳陷边台变质岩潜山油藏裂缝分布特征[J]. 石油大学学报, 1997, 21(3): 16-19.
- Zeng Lianbo, Zhang Jichang. Distribution of fracture in buried hill reservoir of metamorphic rock in Biantai of Liaohe Depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1997, 21(3): 16-19.
- [27] 曾联波, 张建英, 张跃明. 辽河断陷盆地静北潜山油藏裂缝发育规律[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(6): 381-385.
- Zeng Lianbo, Zhang Jianying, Zhang Yueming. The study of fissures development in Jingbei buried hill, reservoir in Liaohe Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1998, 12(6): 381-385.
- [28] 肖淑蓉, 张跃明. 辽河盆地基岩潜山油藏裂缝型储层特征[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(2): 108-111.
- Xiao Shurong, Zhang Yueming. Fractured reservoirs of paleo-buried-hill basement in Liaohe Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000, 14(2): 108-111.
- [29] 张震, 鲍志东. 松辽盆地朝阳沟油田储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2012, 16(4): 166-172.
- Zhang Zhen, Bao Zhidong. Development characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Chaoyanggou Oilfield, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 66-172.
- [30] 单俊峰. 辽河坳陷变质岩潜山内幕成藏条件研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- Shan Junfeng. The research of inner structure hydrocarbon accumulation conditions of Metamorphic rock buried hill in Liaohe Depression [D]. Beijing: China university of Geosciences (Beijing), 2007.
- [31] 易士威, 赵淑芳, 范炳达, 等. 冀中坳陷中央断裂构造带潜山发育特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 361-367.
- Yi Shiwei, Zhao Shufang, Fan Bingda, et al. Development characteristics of paleo-buried-hill and reservoir-forming pattern in central faulted structural belt of Jizhong Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 361-367.
- [32] 张岚, 霍春亮, 赵春明, 等. 渤海湾盆地锦州南油田太古界变质岩潜山储层裂缝三维地质建模[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 12-15.
- Zhang Lan, Huo Chunliang, Zhao Chunming, et al. Geologic molding of Jinzhounan Neo-Archean metamorphic buried hill fracture reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(2): 12-15.
- [33] 刘国平, 曾联波, 雷茂盛, 等. 徐家围子断陷火山岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 329-337.
- Liu Guoping, Zeng Lianbo, Lei Maosheng, et al. Fracture development characteristics and main controlling factors of the volcanic reservoir in Xujiaweizi Fault Depression [J]. Geology in China, 2016, 43(1): 329-337.
- [34] 周勇, 纪友亮, 张善文, 等. 胶莱盆地莱阳凹陷莱阳组低渗透砂岩储层特征及物性控制因素[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 611-620.
- Zhou Yong, Ji Youliang, Zhang Shanwen, et al. Characteristics and controlling factors on physical properties of low-permeability sandstones of the Laiyang Formation in the Laiyang Sag, Jiaolai Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 611-620.
- [35] 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等. 冀中坳陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践[J]. 石油学报, 2012, 33(S.1): 71-79.
- Zhao Xianzheng, Wang Quan, Jin Fengming, et al. Main controlling factors and exploration practice of subtle paleo-buried-hill hydrocarbon reservoir in Jizhong Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S.1): 71-79.
- [36] 高先志, 陈振岩, 邹志文, 等. 辽河西部凹陷兴隆台高潜山内幕油气藏形成条件和成藏特征[J]. 中国石油大学学报, 2007, 31(6): 6-9.
- Gao Xianzhi, Chen Zhenyan, Zou Zhiwen, et al. Forming conditions and accumulation features of oil pools within the inner of highly paleo-buried-hills of Xinglongtai in west sag of Liaohe Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(6): 6-9.
- [37] 李明刚, 漆家福, 童亨茂, 等. 辽河西部凹陷新生代断裂构造特征与油气成藏[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 281-288.
- Li Minggang, Qi Jiafu, Tong Hengmao, et al. Cenozoic fault structure and hydrocarbon accumulation in Western Sag, Liaohe Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 281-288.
- [38] 马寅生. 燕山东段一下辽河地区中生代盆山构造演化[J]. 地质力学学报, 2001(1): 79-91.
- Ma Yansheng. The evolution of mesozoic-cenozoic basin-mountain structure in the east yanshan area and xialiaohe basin [J]. Journal of Geomechanics, 2001(1): 79-91.
- [39] 慕德梁, 孟卫工, 李成, 等. 断陷盆地陡坡带构造样式与油气聚集—以渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷陡坡带为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 635-642.
- Mu Deliang, Meng Weigong, Li Cheng, et al. Structural style and hydrocarbon accumulation in the steep slope zone of faulted basin—an example from the western sag of the Liaohe Depression, the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 635-642.
- [40] 曹宇森. 辽河油田西部凹陷东营组四级层序下沉积体系特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(5): 8-15.
- Cao Yusen. Characteristics of the sedimentary system for the fourth-order sequences in Dongying Formation of West Sag in Liaohe Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(5): 8-15.
- [41] 谭丽娟, 解宏泽, 张辉, 等. 一种生长断层封闭性定量研究方法: 以辽河坳陷辽中凹陷 JX1-1 油田为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 268-273.
- Tan Lijuan, Xie Hongze, Zhang Hui, et al. A quantitative research method on the sealing of growth faults: a case study of JX1-1 oil field in Liaozhong Sag, Liaohe Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 268-273.
- [42] 朱毅秀, 王欢, 单俊峰, 等. 辽河坳陷茨榆坨潜山太古界基岩储层岩性和储集空间特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1225-1236.
- Zhu Yixiu, Wang Huan, Shan Junfeng, et al. Reservoir lithology and space characteristics of the Archeozoic basement rock in Ciyutuo buried hill, Liaohe Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1225-1236.
- [43] 曹宇森. 辽河坳陷大洼构造带油气来源与充注模式研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 43-48.
- Cao Yusen. Hydrocarbon source and charging pattern in the Dawa Structural Zone of Liaohe Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 43-48.

(编辑 张亚雄)