

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

朱毅秀^{1,2},王欢^{1,2},单俊峰³,杨程宇^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102200; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102200; 3. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院,辽宁 盘锦 124010]

摘要:辽河坳陷茨榆坨潜山太古界变质岩基岩内幕研究程度相对较低。综合利用录井、测井、地震、岩心与实验分析等多种资料,研究岩性特征与空间展布规律、储集空间类型与特征、岩性对物性影响,有助于本区域进一步有效地勘探开发及丰富和完善新型的基岩内幕油气成藏理论。研究区太古界基岩岩性复杂,共分为11类18种。变质岩储层有混合花岗岩、黑云母花岗片麻岩、混合岩化片麻岩、碎裂岩与碎斑岩。基岩在垂向上由下至上分为多个岩性段,平面上具分区性,低部位为混合花岗岩夹碎裂岩、中低部位为混合片麻岩与混合花岗岩夹碎裂岩、较高部位为片麻岩。变质岩潜山的储集空间为裂隙和在裂隙基础上扩大的溶孔和溶缝,以构造裂缝为主,不同岩性裂缝发育程度不同,非均质性强,具有分带特征,断裂发育储集带为主要目标带。岩石类型和矿物种类对茨榆坨潜山基岩储层起控制作用,动力改造的破碎状混合花岗岩与碎裂化花岗片麻岩可作为优质储层。统计显示,研究区深色矿物含量小于10%的碎裂化混合花岗岩和深色矿物含量小于12%的碎裂化花岗片麻岩易于形成优质储集岩。

关键词:基岩;变质岩;岩性;储层;茨榆坨潜山;辽河坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir lithology and space characteristics of the Archeozoic basement rock in Ciyutuo buried hill, Liaohe Depression

Zhu Yixiu^{1,2}, Wang Huan^{1,2}, Shan Junfeng³, Yang Chengyu^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102200, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102200, China; 3. Research Institute of Exploration and Development of Liaohe Oilfield Company Ltd., PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China]

Abstract: Understanding of the interior of the Archeozoic metamorphic basement rocks in Ciyutuo buried hill, Liaohe Depression, is relative poor. The comprehensive research that involves logging, seismic, core and experimental data could be of great help to detect the lithology and distribution of the basement rock, types and characters of reservoir space as well as the impact of lithology on the reservoir physical properties, to further explore and develop petroleum effectively, and to perfect the new theory of petroleum accumulation in the interior of basement rock reservoirs. The Archeozoic basement rock lithology in the study area is quite complicated, and can be classified into 11 categories and 18 kinds. The lithologies of the metamorphic reservoir include migmatitic granite, biotite granite-gneiss, migmatitic-gneiss, cataclasite and murbruk rock. The basement rocks feature vertical segmentation and lateral zonation of lithology: migmatitic granite with cataclasite interlayer occurring the lower part, migmatitic-gneiss and migmatitic granite with cataclasite interlayer in the middle-lower part, and gneiss in the upper part. The reservoir space of the metamorphic buried hill is cracks and dissolved pores and fractures starting from the cracks, with the structural fractures being dominant. The fractures are developed to various degrees in different lithologies, have strong heterogeneity, and are characterized by zonation. Reservoir zones with highly developed fractures are the main target of the exploration. The basement rock reservoir in Ciyutuo buried hill is controlled by petrology and mineralogy. Fragmented migmatitic granite and fragmented granite-gneiss could be quality reservoirs. Statistics show that the

收稿日期:2018-06-17;修订日期:2018-08-20。

第一作者简介:朱毅秀(1966—),男,博士、副教授,岩石学、沉积学及储层地质学。E-mail:Zhuyixiu@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05006-005,2016ZX05063-002)。

cataclasite-migmatitic granite with a ferromagnesian content of less than 10% and the cataclasite granite-gneiss with a ferromagnesian content of less than 12% are favorable for the formation of quality reservoir rocks.

Key words: basement rock, metamorphic rock, lithology, reservoir, Ciyutuo buried hill, Liaohe Depression

沉积盆地正常沉积层之下埋藏的底板地层称为基岩^[1],对应的油气藏可分为有山形“潜山”^[2-3]和无山形的基底块体油气藏,即顶部的基岩潜山油气藏和内部的基岩内幕油气藏^[4-5]。基岩已成为国内外油气勘探的重要领域,基岩潜山油气藏的形成和分布具有广泛性^[6-12]。前人的研究侧重此类油气藏的分类与成因特征,主要研究潜山顶部油气藏^[13-14],储层特征方面偏重于物性的研究,主要表征基岩顶部风化淋滤的孔、缝和断裂发育的裂隙^[15-20],强调构造活动对储集空间的控制。最近十年来国内对基岩内幕油气藏储层有所研究^[20-23],阐述裂缝是变质岩内幕油气藏储层的主要储集空间,构造运动和断裂活动历史是裂缝发育的重要因素,也从是否有利于裂缝形成角度认为岩性是基岩储集性能的重要控制因素^[24-25]^{①②},并提出优势岩性序列概念^[26]^{①②}。国内基岩为变质岩及变质岩内幕油气藏最先在辽河拗陷发现,对辽河拗陷变质岩内幕裂隙特征研究近些年较多,主要集中在成藏作用与控制因素方面。国外基岩油气藏研究成果整体比较薄弱,对基岩储层储集空间类型、构造成因与分类进行过一些研究^[27-29]。

辽河拗陷茨榆坨构造带潜山的勘探始于20世纪80年代初期,多井钻遇潜山,揭露潜山最深达400多米(茨109井450 m)。潜山井段出油点多而零散,有几十口井见不同级别的油气显示,产量也普遍较低,没有形成规模,仅在少量井获工业油流(如茨26-117井、茨26-118井等),并具一定生产规模^②。整体潜山勘探程度中等到低,前人主要从成藏作用和控制因素方面进行研究^[30-31],研究程度相对较低,岩性和储集性认识不清、分布不明。因而较全面研究茨榆坨潜山太古界变质岩基岩的岩性特征与空间展布规律、储集物性、岩性对物性影响等,有助于本区进一步有效地勘探与开发生产,为辽河拗陷及其它地区相似基岩潜山的生产与研究提供借鉴作用,同时有利于丰富和完善新型的基岩内幕油气成藏理论。

1 研究区区域地质特征

茨榆坨构造位于辽河拗陷东部凹陷东北部,属基

岩断块潜山构造带,西与大湾超覆带相接,东和牛居—长滩生油洼陷相邻,东、西两侧分别以茨东断层和茨西断层为界(图1),这两条倾向相反断层夹持形成总体沿东北到西南方向展布的高垒带。复杂断层系统的控制和影响形成了沿边界断层(茨西)两盘分布的一系列单面山型潜山带,沿断层上升盘近东西向和近南北向呈条带状展布。单面山的“山峰”,位于茨西断层的上升盘,随着茨西断层起伏,其“山坡”在近东西向断层的切割下,形成“峰”、“谷”相间的近东西向潜山带。潜山带再被近南北向断层切割成断鼻和断块圈闭^③。区内断层十分发育(图1),此次共解释大小断层30多条,其中南部断层较少、断距较大,北部断层密布、呈网状、断距较小。从走向看,在平面上主要有北东向、近东西向和南北向3组方向,对应主控断层、伴生断层和更次级断层,数量由少到多、规模由大到小、断距由大到小。潜山顶面埋藏深度西高东低、北高南低,构造带区域东倾。

新生代之前本区长期出露地表,未接受沉积,并遭受风化剥蚀。早期构造运动以及由于潜山岩性差异导致风化剥蚀的差异,使潜山面起伏不平,潜山形成雏形,形成了总厚度约1 800 m的复杂变质岩系。新生代茨榆坨构造带和区域构造发育史相同,大致经历了拱张—断陷—拗陷—回返—消亡的过程,形成了巨厚的新生代沉积岩层序。这样出现了以太古界变质岩潜山为基底,缺失元古界至中古生界,直接上覆新生界的地层组合。在不同时代有岩浆的侵入和喷出活动,出现了多组嵌入层序内的侵入岩与夹于层序中的喷出岩。

2 研究区太古界变质岩石学特征

2.1 岩石类型与含量

通过钻遇研究区太古界潜山几十口井的岩心和岩屑观察,借助系列岩性实验室鉴定及前人实验测试分析等资料,可知茨榆坨潜山岩性复杂,主要由太古界鞍山群的变质岩系组成,可见区域、混合和动力等变质作用形成的混合花岗岩、混合片麻岩、混合岩、片麻岩、碎裂岩、碎斑岩等变质岩(图2,图3),还有少量燕山期或

① 王仁厚,宋柏荣,边少之,等. 西部凹陷兴隆台潜山微观储层特征研究[R]. 辽河油田勘探开发研究院(内部报告),2006.

② 朱毅秀,谢庆斌,宋玲,等. 东部凹陷茨榆坨潜山储层评价及有利地区预测[R]. 中国石油大学(北京)(内部报告),2007.

③ 李军,刘敬,慕德梁,等. 茨榆坨构造带潜山勘探目标评价[R]. 辽河油田勘探开发研究院(内部报告),2002.

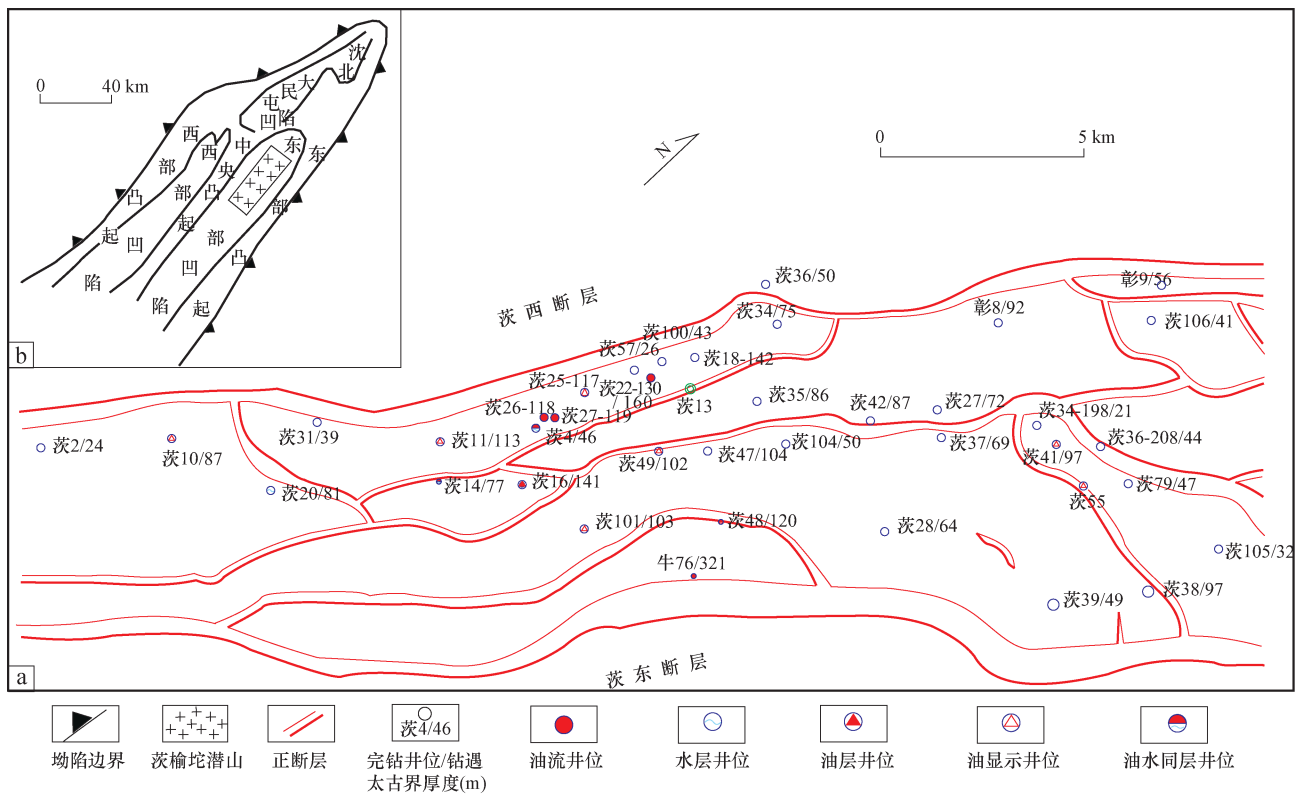


图 1 辽河茨榆坨构造带基岩顶面构造(a)与研究位置(b)
Fig. 1 Top structure (a) and location (b) of the basement rock in Ciyutuo structural belt, Liaohe Depression

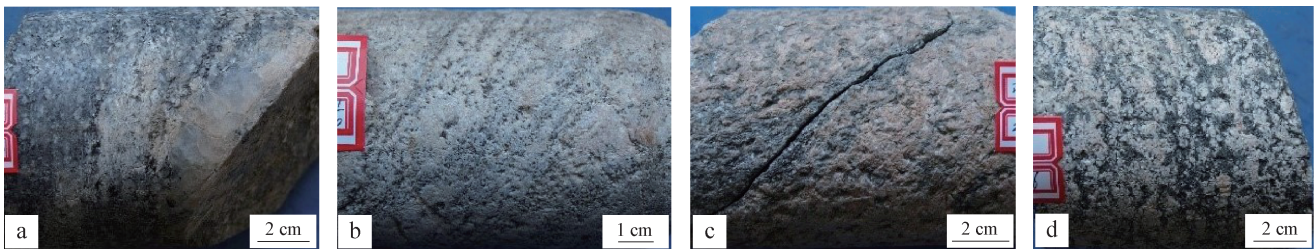


图 2 辽河茨榆坨构造太古界基岩花岗片麻岩和混合花岗岩岩心展示
Fig. 2 Cores of granitic gneiss and migmatitic granite of the Archeozoic basement in Ciyutuo buried hill, Liaohe Depression
a. 混合花岗片麻岩,基体与脉体,茨 104 井,埋深 2 723.2 m; b. 花岗片麻岩,溶孔,牛 76 井,埋深 2 966 m; c. 混合花岗岩,裂隙,茨 104 井,埋深 2 723.2 m; d. 眼球状混合花岗岩,茨 27 井,埋深 2 771.6 m

喜马拉雅期岩浆活动形成的脉岩类－煌斑岩(云煌岩)和辉绿岩等(表 1),其中,中深变质岩类百分含量占 95% 以上。

2.2 主要岩石类型特征

2.2.1 花岗片麻岩

主要包括黑云母二长片麻岩和黑云母钾长片麻岩(图 2b)。多为灰色、灰红色、灰白色,片麻状构造(仅岩心可见,图 2b),晶粒大小 0.2 ~ 13.0 mm、以粗粒为主,粒状变晶结构、鳞片花岗变晶结构(图 3a—c, j)。矿物组分主为浅色长英质的钾长石、斜长石与石英和深色的黑云母与角闪石,深色组分也较少。他形的石

英颗粒内密集微裂缝、且缝多被方解石晶体愈合。斜长石和钾长石蚀变强烈,多粘土化、绢云母化,沿解理缝蚀变明显,碎裂强、粒内微裂缝交错、相互切穿而成微网状,方解石和泥质愈合微缝;密集双晶纹发育的中酸性斜长石(更长石与中长石)相对细小,板柱状钾长石粒粗、粒径多达 10 mm 以上、多为不发育聚片双晶的微斜长石和条纹长石,不同片麻岩长石总量相当、种类相差较大。黑云母呈黄绿色,多为弯曲变形的片状,绿泥石化。X－衍射全岩元素分析显示石英含量为 18.7% ~ 38.4%,斜长石含量为 21.8% ~ 40.6%,钾长石含量为 18.2% ~ 47.3%,粘土总量(以绿泥石为主,多为黑云母和长石蚀变而来)为 5.9% ~ 16.4%,

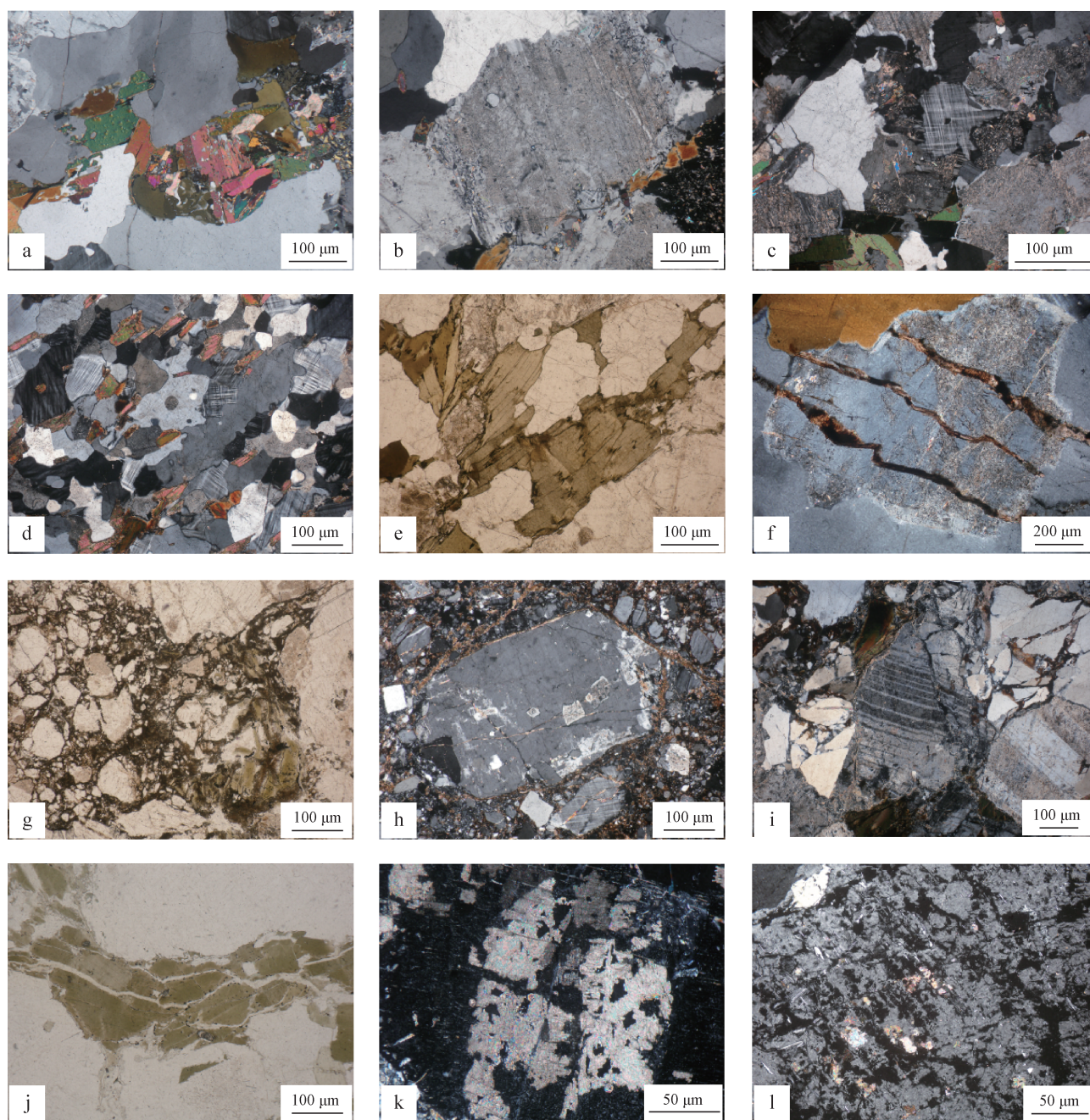


图3 辽河茨榆坨构造基岩不同类型变质岩岩性与微观孔缝显微特征

Fig. 3 Lithology of varying metamorphic rocks and microscopic features of micro-pores and -fractures in the basement of Ciyutuo buried hill, Liaohe Depression

a. 混合岩化黑云母花岗片麻岩,黑云母和石英,茨37井,埋深2 509 m,正交光;b. 黑云母花岗片麻岩,斜长石蚀变与钾长石边,茨104井,埋深2 722.7 m,正交光;c. 混合岩化黑云母二长片麻岩,长石与石英,牛76井,埋深3 044.8 m,正交光;d. 混合花岗岩,花岗变晶结构,牛76井,埋深2 964.8 m,正交光;e. 混合花岗岩,黑云母聚斑及裂缝,牛76井,埋深3 220 m,单偏光;f. 混合花岗岩,长石内平行裂缝、泥质半充填,茨11井,埋深2 404.3 m,正交光;g. 碎裂混合花岗岩,破碎与糜棱泥充填,茨21井,埋深2 310 m,单偏光;h. 碎裂混合花岗岩,碎斑结构与充填,茨21井,埋深2 310 m,单偏光;i. 碎裂混合花岗片麻岩,破碎与充填,茨26-118井,埋深2 323 m,正交光;j. 黑云母花岗片麻岩,黑云母内未充填的裂缝,茨41井,埋深2 312.5 m,单偏光;k. 碎裂混合花岗岩,长石溶蚀孔充填的方解石及再溶蚀,茨27井,埋深2 772.2 m,正交光;l. 混合花岗岩,斜长石内溶孔与破裂缝,茨55井,埋深2 376.8 m,正交光

黑云母含量为4.5%~17.3%。

片麻岩类(也包括混合岩化的片麻岩)含有一定量深色矿物(主要是黑云母和角闪石),高中子、较大

密度、较大光电吸收截面指数。密度曲线与补偿中子曲线呈小的“负差异”或“绞合状”特征。自然伽马一般在75 API以上,呈“锯齿”状。

表 1 研究区太古界潜山岩石类型及实验分析含量

Table 1 Rock types of the Archeozoic Ciyutuo buried hill and experimental analysis of their contents, Liaohe Depression

分类	亚类	主要类型	岩石名称	百分含量/%	检测样品来源
变质岩	区域变质岩	片麻岩类	(黑云母)花岗片麻岩	26.25	岩心、岩屑
			黑云母角闪斜长片麻岩	2.75	岩心、岩屑
		长英质粒岩类	黑云母变粒岩	1.50	岩屑
			角闪斜长变粒岩	—	岩屑
		角闪质岩类	斜长角闪岩	2.50	岩心
			角闪石岩	—	岩心
	混合岩	混合岩化变质岩类	混合岩化(黑云母)花岗片麻岩	1.50	岩心、岩屑
		混合片麻岩类	斜长混合片麻岩	4.25	岩心、岩屑
			混合花岗片麻岩	—	岩心、岩屑
		混合花岗岩类	钾长混合花岗岩	48.25	岩心、岩屑
			二长混合花岗岩	—	岩心、岩屑
		构造角砾岩类	构造角砾岩	7.75	岩心、岩屑
岩浆岩	动力质岩	碎裂岩类	碎裂混合花岗岩	—	岩心、岩屑
			碎裂片麻岩	—	岩心、岩屑
			长英质碎斑岩与碎裂岩	0.25	岩屑
		糜棱岩类	糜棱岩	0.50	岩心、岩屑
		基性岩	辉绿岩	1.75	岩心、岩屑
		脉岩	煌斑岩/云煌岩	2.75	岩心、岩屑

注:“百分含量”为岩心与岩屑观察定名和实验室显微镜镜下鉴定定名的统计结果。“—”表示未统计。

2.2.2 混合花岗岩

混合花岗岩(图 2c,d;图 3d—f,k,l)是本区变质程度最深和发育最多的变质岩。多呈灰白色、肉红色,块状构造,粒状(花岗)变晶结构。混合岩化作用强烈,基体和脉体在部分岩心中(图 2a,浅色硅质脉体)相混清晰可见,色深早先形成的残留的区域变质岩构成基体和色浅偏酸性新生的长英质脉体以不同的数量和方式相混合,并形成多种混合构造。此处混合花岗岩岩性成分相当于花岗岩,显微镜下仅以微斜长石发育为特征,过去研究报告多认为是 26 亿年前岩浆结晶而成的花岗岩,另在其内仍可见交代反应后残留的基体特征、可见暗色矿物较集中的斑点、条痕或团块、分布不均匀。岩石中深色矿物以黑云母为主,少量角闪石,深色矿物含量多小于 20%。X-衍射全岩元素分析显示石英含量为 21.2%~37.8%,钾长石含量为 23.5%~65.1%,斜长石含量为 15.5%~32.8%,粘土矿物总量为 1.3%~10.3%(主要矿物粘土化形成),方解石含量为 0.5%~3.2%。

混合花岗岩在测井响应特征为密度、中子、高光电吸收截面指数均低,密度曲线与补偿中子曲线往往表现为“正差异”或“绞合状”特征,自然伽马一般在 75 API 以上,为“小锯齿”状。

2.2.3 碎裂岩

构造破碎带内机械破碎和强烈变形而形成了碎裂-动力变质岩在本区分布较多,主为碎裂岩,多靠近断裂带,整体多呈狭长的带状分布。本区主要包括碎裂化的多种区域变质岩和动力变质程度高的碎斑岩(图 3g—i)及少量糜棱岩。碎裂岩多呈无定向构造,具碎裂结构和糜棱结构,碎裂化程度较高,主要为碎裂化的混合花岗岩、碎裂化的混合岩与碎裂化的花岗片麻岩。岩心呈破碎状,保留原岩特征,组分基本同于原岩。碎裂化的混合花岗岩仍为长英质,石英含量在 40%~50%,长石含量在 40%~70%,相对原岩富硅。不同级的构造裂缝发育,部分被方解石、石英细碎屑和长英质糜棱组分(断层泥)充填,破碎粒间孔发育,孔隙多含沥青。碎裂化的混合花岗岩测井曲线基本同于混合花岗岩。如茨 27 井 2 807.5 m 和牛 76 井 2 996.0 m 分别发育了碎裂花岗片麻岩和与碎裂混合花岗岩。裂缝发育的碎裂岩较破碎,钻遇碎裂岩层段同于孔缝发育的风化壳层段取心率多低于 30%,发育良好储集空间的碎裂岩层段不易取心。

2.2.4 脉岩

本区岩浆岩多呈岩墙和岩脉产出,岩性主要为辉绿岩和煌斑岩(云煌岩)、岩性致密、暗色脉岩,穿插于

变质岩体中。测井响应特征表现密度、中子、光电吸收截面指数均高的特征,密度与补偿中子曲线为大的“负差异”,自然伽马值低于40API,区域研究显示它为中新生代岩浆侵入形成。

2.3 变质岩中几种主要造岩矿物特征与蚀变

研究区基岩主要矿物是长石,包括斜长石和碱性长石(条纹长石、正长石与微斜长石)两大类,多具完全和中等、近直交的两组解理,脆性强、硬度6。蚀变强烈,在其晶内和晶间形成多种溶蚀孔;外力作用下的长石易沿解理缝扩宽与破裂,同时溶蚀淋滤也多沿解理缝和双晶缝发生,构造力与溶蚀使此矿物晶内缝隙开度变大,并形成各种具有储集性的孔缝。此处碱性长石多为混合岩化过程中形成的,抗风化、蚀变能力较强;斜长石为区域变质作用的产物,经历相对更长期的蚀变,其钠黝帘石化和绢云母化一直较强。但混合作用及深埋作用时,相对高温与热液作用,碱性长石由常规的高岭土化为主的粘土化到相对高温时出现绿帘石化和方解石化,观察显示碱性长石比斜长石变化更强烈,其在长石中更易于形成溶孔与溶缝。

本区石英含量仅次于长石,颗粒粒径大大小于长石。一般无色或浅灰白色,硬度7,是稳定不易变化的矿物。在强力作用下也可以产生破碎缝、多硅化愈合的缝隙;在断裂构造破裂带内碎裂岩的研磨、粒化强烈部位,石英呈粉末状的糜棱组分,重结晶与硅化作用使岩石致密。稳定石英罕见有溶孔,在阴极发光显微镜下可见石英破裂及硅质愈合。石英在风化壳等特殊位置可见溶蚀、碳酸盐化和泥化,更多是以其它矿物变质重结晶终极矿物,混合岩的脉体出现,多呈不规则形态、粒状、子晶等产出。

黑云母在基岩中普遍分布(图3a,e,j)。晶体完好的黑云母呈假六方形、片状、鳞片状,硬度在2.5~3,显微镜下呈现长条状、片状,一组极完全解理,多色性明显。黑云母为铁镁矿物、易水解蚀变,常绿泥石化,黑云母片有弹性,在构造应力作用下,当碎裂缝顺其解理发展时,碎裂方向受解理控制,沿解理裂开,易沿解理缝发生溶蚀、产生解理溶缝;当碎裂缝垂直黑云母解理方向发展时,缝隙往往被黑云母阻挡,或沿其边部曲折通过,强力或长期受力作用,也可发生碎裂或变形。在混合岩和片麻岩中黑云母由于成岩作用易出现多个个体汇聚而形成聚斑,这个聚合体易于改变应力而出现复杂的微裂缝(图3j)。相对其它造岩矿物,黑云母易于溶蚀与改变应力方向出现溶孔、溶缝和微裂缝。

3 研究区太古界变质岩空间分布

3.1 单井(典型井)岩性分布

岩性确定借助岩心岩屑观察、多种薄片分析和测井响应,建立相关不同岩性测井识别图版及岩性识别标准,在井剖面上识别岩性。下面以牛76井为例说明单井岩性纵向或部分垂向分布。

牛76井进入潜山320.55 m,取心5次(共4.76 m),井壁取心43块,不同井段岩性分布不同。2 880~2 946 m井段测井解释和录井解释为富含油层,岩性为灰白色块状混合花岗岩、混合花岗岩片麻岩。顶部约30 m为风化破碎带,往下约十多米的淋滤溶蚀下部胶结带、较致密,再往下为构造裂隙发育井段。2 946~3 023.5 m井段岩性为灰白色块状混合花岗岩夹混合片麻岩,以混合花岗岩为主,夹多段辉绿岩和煌斑岩岩墙与岩脉产出,此段为构造裂隙不均匀发育井段,以裂隙发育为主,裂隙和岩浆侵入有关,裂隙发育段见碎裂化与碎裂混合花岗岩与片麻岩。3 023.5~3 044 m井段岩性为灰色、灰白色块状油迹(荧光)混合花岗岩夹辉绿岩岩脉,构造裂隙发育,在裂隙破碎带中见碎裂化与碎裂混合花岗岩。3 044~3 080 m井段岩性为灰白色块状混合花岗岩夹碎裂化混合花岗岩与辉绿岩(岩脉),构造裂隙不均匀发育段,裂隙、岩浆侵入和断层有关。3 080~3 108.1 m井段为混合花岗岩夹混合花岗岩片麻岩段,致密,少量层含裂缝,测录井解释不含油。3 108.1~3 122.4 m井段为绿灰色荧光碱性脉岩夹混合花岗岩,致密,少量层含裂缝,不含油。3 122.4~3 200.50 m井段为灰白色荧光混合花岗岩夹混合花岗岩片麻岩段,构造裂隙较少,3 185~3 196.50 m层段为岩心破碎段、为构造裂隙发育段。

牛76井以油迹与荧光混合花岗岩夹混合(花岗岩)片麻岩为主,其间夹大量辉绿岩岩脉和岩墙。从进山的风化壳、风化破碎带和淋滤溶蚀带、致密带,至构造裂隙带与致密带,裂隙带不断穿插致密岩层中,同时穿插岩脉和岩墙。岩浆岩岩脉与岩墙和构造裂隙带多伴生,脉体多对裂隙切断与隔离,构造裂隙发育段在此井段由上至下均很发育,在井底仍有十米长的构造裂隙发育段。

3.2 岩性垂向分布

综合比较区域太古界岩性组合特征、各单井岩性组合、地球物理响应和平面及构造位置、可能叠置关系等归纳出研究区地层岩性组合及空间分布特征,垂向

上共分出多个相邻岩性段(图 4),从上至下出现片麻岩与变粒岩、混合片麻岩与混合花岗岩、混合花岗岩等岩性段,其间夹不同程度的动力变质岩。不同地区发育层段不一样,研究区不是每一口井均发育全部层段。

3.3 研究区岩性平面分布

综合岩心描述、薄片、测井和录井分析等资料,统计出研究区不同岩性平面分布特征、编制出研究区岩性平面分布图(图 5),主要岩性分布如下。

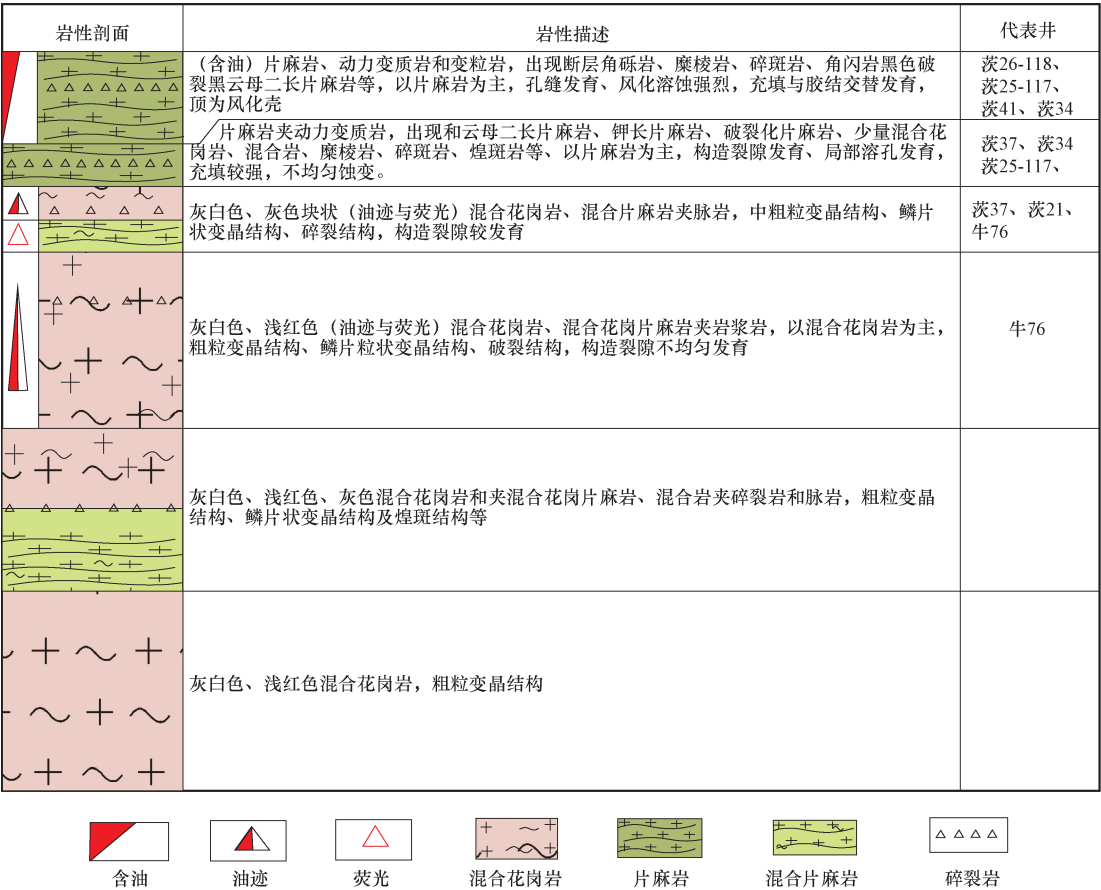


图 4 辽河茨榆坨构造基岩岩性垂向分布

Fig. 4 Lithologic columnar section of the basement rocks in Ciyutuo structural belt, Liaohe Depression

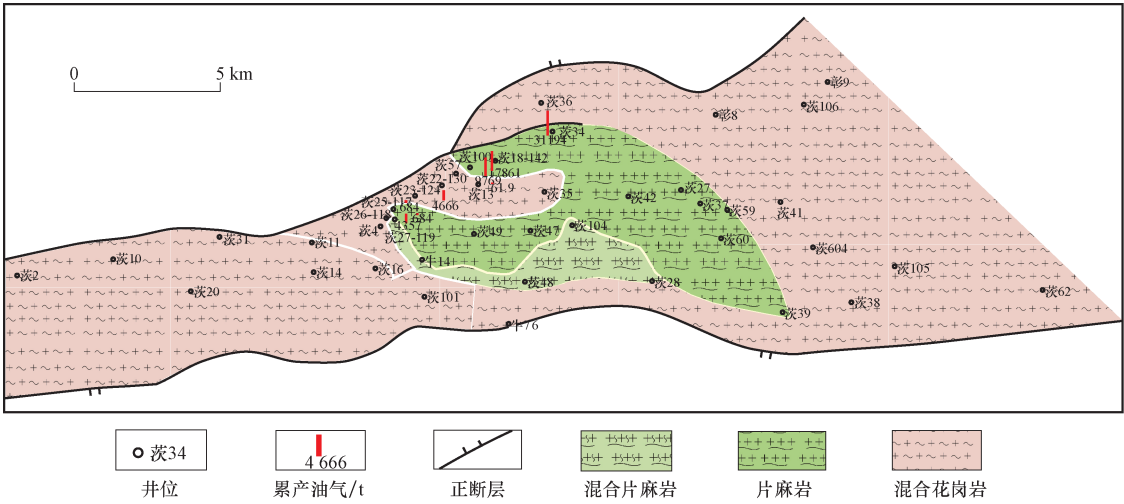


图 5 辽河茨榆坨构造基岩平面分布

Fig. 5 Planar distribution of the basement rocks in Ciyutuo structural belt, Liaohe Depression

3.3.1 (花岗)片麻岩分布区域

主要在高、中潜山带分布,多位于潜山的高部位,以茨36-茨27-茨37-茨59-茨39-茨49-茨13-茨100-茨34-茨36所围成的不规则区域,占研究区中高部位的大部分区域,也是目前已发现油气的区域,在所揭示的地层风化壳层位岩性50%以上为花岗片麻岩。垂向上片麻岩夹一些基性脉岩和碎裂岩,在靠近混合花岗岩接触处混杂较多的混合花岗岩,有时出现不等厚的花岗片麻岩与混合花岗岩互层。目前钻遇花岗片麻岩均具有一定的溶蚀扩大裂隙、缝隙多由绿泥石、方解石、硅质和铁质等充填与半充填。

3.3.2 混合(花岗)片麻岩分布区域

混合片麻岩在中潜山带分布,多位于潜山的中部位,沿茨28-茨48-茨4-茨47-茨104-茨28所围成的不规则区域,相对局限。岩性主为混合黑云母二长片麻岩与钾长片麻岩(混合片麻岩)、混合岩夹一些基性脉岩和碎裂(化)岩,另有少量的花岗片麻岩、混合花岗岩混杂分布。

3.3.3 混合花岗岩分布区域

全研究区均有分布,是研究区分布最广泛的岩类,主要在茨东断层的西侧和茨西断层的东侧,片麻岩外围地区潜山低部位分布。岩性主要为混合花岗岩(茨20井、牛76井、茨57井)、碎裂混合花岗岩(茨101井、茨25-117、茨26-118井),可见眼球状和条带状混合花岗岩,其中混杂多种碎裂岩和基性脉岩。动力改造的混合花岗岩内存在多种被充填、半充填和未充填的裂隙。

4 研究区太古界变质岩储集空间特征

研究区太古界潜山基岩储层,经历了多种深埋、表生、岩浆和动力等长期改造,发育了不同类型的储集层段。钻遇茨榆坨构造基岩的探井与开发井均显示油气较丰富,潜山变质岩储层是茨榆坨构造带内重要油气储层。

4.1 基岩(变质岩)储层纵向分带性

研究区基岩(变质岩)储层在横向和纵向均有显著的差异,依据变质岩经历的外营力、风化溶蚀、岩石破碎、孔缝发育、电性等特征,基岩自上而下分为风化破碎储集带、裂隙发育储集带和致密带3个带^[32]。

风化破碎储集带为岩石破碎带,厚度和岩性、风化

程度、构造运动等相关,从几米到几百米不等,茨榆坨基岩风化破碎储集带由几十米至200 m,目前钻遇基岩井85%以上在此带内完钻。储集空间类型为蚀变加强的构造裂缝和碎裂岩粒间孔、溶蚀孔隙。

裂隙发育储集带位于风化破碎储集带下方,其内断裂破碎带不均匀发育,其发育程度与构造活动和岩石类型关系密切。借助茨榆坨潜山地震资料分析该带为风化壳下几十米至近千米,此范围与断裂带是否发育相关,研究区无井钻穿此带。茨榆坨潜山裂隙发育储集带储集空间为构造裂隙(包括微裂隙),碎裂岩粒间孔及裂隙溶蚀扩大孔。如牛76井、茨26-118井和茨25-117井均钻遇此带,并获得相当产能。

致密带位于风化壳下几百米至几千米的岩体下部,为非储层段,目前所钻井未曾钻到此带。

茨26-118井2 294.0 m进山,2 294.0~2 316.44 m为风化壳-风化破碎储集带,2 316.44~2 390 m(井底)为裂隙发育储集带。该裂隙发育储集带分为多个致密层段、充填致密段和裂隙发育段,测井显示2 323~2 358 m和2 362~2 373 m两段为碎裂混合花岗岩段,呈现断层破碎-裂隙发育储集段,有工业油气产出,此段变质岩储层为低孔隙中、低渗透性到特低孔特低渗性型。

4.2 储集空间类型及特征

测试分析显示本区基岩储层具有双重介质的特征,分为孔隙型和裂隙型,以裂隙型为主。由于研究区钻井和取心原因,本区宏观裂缝普遍未见,主要见一些延伸很短的微裂缝。大量的岩心观察描述和薄片鉴定显示本区主要储集空间类型为构造裂缝、溶孔与裂缝溶蚀扩大孔、少量碎裂岩粒间孔。综合孔、缝成因、分布位置和发育程度等特征将本区太古界潜山变质岩储层储集空间主要为裂缝与溶孔(图3f-1),以裂缝为主。

4.2.1 构造裂隙(缝)

构造裂隙多发育在断层附近,与断裂破碎带相关,研究区中茨东、茨西大断层上盘或下盘及其相关岩体中构造裂隙发育。研究区所见构造裂缝孔隙度为0~6.3%,主要集中在0.5%~4.8%。这些裂缝除和构造相关外,和岩性也有一定关系。茨100井2 155~2 180 m井段片麻岩,其岩心裂缝密度为8~15条/m,密集处达34条/m,方解石充填或半充填裂缝,油斑与油迹状、含油不均匀。研究区基岩发育与茨榆坨构造带内两大断层系统展布一致的裂缝体系,整体裂缝呈

北东向和北西向、局部近东西向和近南北向,发育高角度张性裂缝、倾角大于 45° 的达78%,缝宽多为 $1\sim 1\,000\ \mu\text{m}$,储层以中、小缝为主,小缝和微裂缝占统计裂缝总条数的66.7%。被方解石和泥质等充填或半充填大缝、中缝、小缝,也可见溶蚀沿构造裂缝展开,出现因风化、溶解而使裂缝加宽现象。直井仅揭示部分能取心的岩性,岩心裂缝发育程度可能远低于地下岩体实际裂缝发育程度。本区构造裂隙(缝)发育的储层是基岩主要储层类型。研究区基岩油藏的储集层多为裂缝性储层,裂缝是主要的储集空间和渗流通道,裂缝发育程度和分布状况影响了产能。

4.2.2 溶孔

溶孔主要分布于风化破碎储集带中,少量分布在浅层裂缝发育的储集带内碎裂颗粒间孔中,溶蚀作用在本区潜山基岩裂缝发育储集带中发育较差。研究区局部变质岩储层中溶孔发育,孔隙度可达6%~7%。溶蚀孔隙孔径往往是构造裂隙宽度的数倍,孔径多为 $0.05\sim 1.00\ \text{mm}$ 。变质岩内较大溶孔多是孤立的,中、小孔连片分布也可见。溶孔受岩性和构造双重控制,在构造裂隙拐弯、暗色矿物聚斑等位置易出现溶孔,溶蚀作用加宽了构造裂缝、而裂缝连通溶孔。如茨48井取心段片麻岩储层的孔隙度为2.0%~2.2%,其中溶孔孔隙度为1.2%、裂隙孔隙度为1%,二者近于相当。

4.2.3 断层破碎带风化淋滤孔洞

张性正断层破碎带内分布各种动力变质岩,碎裂化的变质岩结构疏松、裂缝发育,糜棱粉粒充填粒间,经风化淋滤作用,出现大量溶孔和扩大的裂隙,裂缝连通溶孔(溶洞)、孔缝网状交织,形成了风化淋滤孔洞和储集性能极好的储集带,但分布仅限于风化破碎储集带,基本不沿续到下层的裂隙发育储集带。在茨东与茨西深大断裂附近的井中能钻遇此带,是油气成藏非常有效的运移通道。富含断层破碎带风化淋滤孔洞的储集体如能含油气,将是极富油气带,也是钻井开发生产极具风险带。

5 岩性对基岩储集性能的影响

本区太古界变质岩系在漫长二十多亿年的地质演化过程中,岩内孔缝经历了形成、充填、溶解、再形成等多次往复演化,直至目前仍被充填或残留保存的孔隙和裂缝。长期的、不规则交替出现的岩浆与热液的能

量和物质交换、脉体的混合、构造变形与碎裂、表生及不同深度的溶蚀和充填改造,多重内生与外生改造,形成了目前研究区内不均匀分布的低孔中低渗型、特低孔低渗型、特低孔特低渗性型等多种基岩储层,岩性特征对这种演变具有重要控制作用。裂缝主要分布在断层附近,越靠近断层裂缝越发育,同时裂缝的密度受岩性的控制^[33]。对储层来说,岩性和构造作用一样,是储层形成与储集空间保存的两大核心控制因素之一。

5.1 长英质矿物和深色矿物对储层物性的影响

具中等和完全两组解理的正长石与斜长石,长条状与板柱状晶常定向排列、性脆,易粘土化及蚀变,溶蚀易形成粒内溶孔(图3k,l)和铸膜孔;解理和双晶存在使长石受力后易发生变形、破裂,或沿解理缝与双晶缝裂开、加宽了解理缝,形成构造裂隙;构造应力与溶蚀共同作用易在裂隙中形成溶蚀扩大缝,使缝宽加宽、伸长(图3f)。

石英比较稳定,不易蚀变、罕见有溶孔,在强力作用下易出现破裂,日前多被后期的硅质和方解石愈合。

深色矿物(黑云母和角闪石)多呈长条状、柱状,柔性强,在力的作用下多定向排列。深色矿物属铁镁矿物,易蚀变,在后期变化中易形成各种溶孔形成的物质基础。同长石一样具完全解理的黑云母与角闪石受力后易形成构造裂隙(图3j),力和溶蚀共同作用也使黑云母和角闪石形成溶蚀扩大缝。强力或长期受力时黑云母和角闪石也会出现变形和碎裂。通常认为柔性深色矿物含量越少,长英质为主的脆性矿物相对越多,越对基岩储层有利,储层中、深色矿物含量和孔渗性呈消长关系。比较基岩中深色矿物(黑云母与角闪石)含量和储层孔隙度渗透率关系,可知碎裂变形与黑云母与角闪石在岩石中含量有一定关系。研究表明,深色矿物含量5%~15%的岩石在相同受力和蚀变演化条件下,孔、缝相对更发育,更利于形成较好的储层。初步认为这是和深色矿物(黑云母和角闪石)的特征相关,这些易溶铁镁矿物常聚斑(图3j)与定向排列,相对长英质矿物柔性更强,多期受力后韧性流变更易发生,更易产生微裂缝,长期受力更易出现构造裂缝。同时适量聚斑的深色矿物具备溶蚀的物质基础,加之更优的微裂缝体系,溶蚀作用相对加强,出现更多的孔缝。此机理有待更进一步探索,此现象有待在其它地方验证。

5.2 岩石类型对储层物性的影响

岩性和构造作用是基岩储层形成与储集空间保存

的两个主要控制因素,构造应力是基岩裂缝形成的外因、岩性是内因。在相同构造应力作用下,含高脆性成分以长英质矿物为主的变质岩比含长英质矿物含量低的更易形成构造裂缝。通常认为黑云母与角闪石等深色矿物的柔性好、塑性强,受相同的应力作用多变形而不易破碎与成缝。因此基岩中常把长英质矿物含量高的花岗片麻岩、混合花岗岩、碎裂化花岗片麻岩和碎裂化混合花岗岩、碎斑岩等岩石称为储集岩,角闪石岩、斜长角闪岩、辉绿岩、煌斑岩等深色矿物含量高的基岩称为非储集岩。

以花岗片麻岩为主的区域变质岩,存在溶孔与溶缝、构造缝、(少量)晶间孔等储集空间。孔缝多少和深色矿物(黑云母和角闪石)含量有关,深色矿物含量大于15%的花岗片麻岩构造裂缝不发育、相对致密,少量裂缝多被绿泥石和碳酸盐矿物充填,存在一些延伸短的细缝和微裂缝。相反本区深色矿物含量小于15%、特别是5%~12%的花岗片麻岩构造裂缝发育,储集物性较好。

混合岩的物性和基岩的基体与脉体各自含量的多少、组分差异、混合程度、后期改造度等因素有关。本区混合岩型基岩主要是混合花岗岩和混合花岗片麻岩,块状构造,其结构均匀、性脆、深色矿物含量多小于15%,构造缝发育。茨26-118井产油井段基岩储层为混合花岗岩,发育构造缝,为中、大未充填缝、缝宽多大于10 mm,孔隙度为3%~8%,平均有效孔隙度为6.4%,渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $11.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,此段为裂缝型储层。

碎裂岩和碎斑岩的基岩,常由长英质矿物组成,发育破碎粒间孔和构造缝,特殊部位的溶孔发育。糜棱岩孔缝不发育、储集性差,多次构造再改造的糜棱岩易形成构造缝,可成为较好储层。

统计比较研究区岩石类型,深色矿物含量和基岩储层物性关系特殊,碎裂化深色矿物含量小于10%的混合花岗岩与碎裂化深色矿物含量为5%~12%的花岗片麻岩为易于形成裂缝、并能保存储集空间的优质基岩储层,其次为其他混合花岗岩、深色矿物含量小于15%的片麻岩,深色矿物含量大于20%的基岩难形成油气储层。

6 结论

1) 茨榆坨潜山基岩岩性复杂,变质岩约占95.5%,细分为11类18种,片麻岩相对发育,变质岩储层有(碎裂化)混合花岗岩和(碎裂化花岗)片麻岩、混合岩

化片麻岩、碎裂岩与碎斑岩。有效储层为碎裂化混合花岗岩与花岗片麻岩。

2) 基岩变质体岩性上为非均一的块状体。基岩在垂向上(由下至上)分为多个岩性段,呈现出混合花岗岩-混合花岗岩与混合片麻岩-黑云母花岗片麻岩-片麻岩与变粒岩及风化壳,均夹脉岩、碎裂岩和碎斑岩。平面上呈现分区性,由低位至中、低位再到高位依次出现混合花岗岩夹碎裂岩,混合岩和花岗片麻岩夹碎裂岩,花岗片麻岩与混合花岗岩夹动力变质岩与变粒岩。

3) 变质岩内幕油气藏储层是可以分带的,断裂发育储集带为基岩内幕油气藏储层主要有利目标段。构造裂缝为主的裂隙型储层为研究区基岩的主力储层。

4) 岩石类型和构造作用对茨榆坨潜山基岩储层起控制作用。碎裂化花岗片麻岩和碎裂化混合花岗岩为研究区基岩油气藏优质储层,碎裂化深色矿物含量小于10%的混合花岗岩与碎裂化深色矿物含量在5%~12%的花岗片麻岩为易于形成裂缝、并能保存储集空间的优质基岩储层,其次为其它混合花岗岩、深色矿物含量小于15%的片麻岩,深色矿物含量大于20%的基岩难形成油气储层。

致谢:项目完成过程中得到中石油辽河油田研究院相关工作人员大力支持与帮助,研究生张伟、宋玲、高兴、张杰、李众和本科生保万明、朱琳琳、师源等同学参与项目研究工作及后续资料整理工作,在此对他们的辛勤劳动与有力支持特致谢意!

参 考 文 献

- [1] 谢文彦,孟卫工,李晓光,等. 辽河坳陷基岩油气藏[M]. 北京:石油工业出版社,2012.
Xie Wenyan, Meng Weigong, Li Xiaoguang, et al. Basement oil-gas reservoir in Liaohe depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [2] Powers S. Reflected buried hills and their importance in petroleum geology[J]. Economic Geology, 1922, 17(4): 233-259.
- [3] 李军,刘丽峰,赵玉合,等. 古潜山油气藏研究综述[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 879-887.
Li Jun, Liu Lifeng, Zhao Yuhe, et al. A review of study on ancient buried hill reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 879-887.
- [4] 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.

- [5] 高先志, 庞雄奇, 李晓光, 等. 断陷盆地潜山构造带油气复式成藏特征及油气藏系列—以辽河西部凹陷兴隆台构造带为例[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(S1): 95–102.
Gao Xianzhi, Pang Xiongqi, Li Xiaoguang, et al. Doubled accumulation features and series of oil-gas reservoir in the buried hill structural belt of the faulted basin: A case study of the Xinglongtai structural belt in the western Liaohe depression[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 38(S1): 95–102.
- [6] 金尚柱. 辽河断陷基岩油气藏类型及其形成条件[J]. 大庆石油学院学报, 1988, 12(3): 16–21.
Jin Shangzhu. Oil and gas reservoir types within the rocks and their formational conditions in Liaohe depression[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1988, 12(3): 16–21.
- [7] 伍友佳, 刘达林. 中国变质岩火山岩油气藏类型及特征[J]. 西南石油学报, 2004, 26(4): 1–4+89.
Wu Youjia, Liu Dalin. The reservoir and characterization of metamorphic and volcanic of China[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(4): 1–4+89.
- [8] 马龙, 刘全新, 张景廉, 等. 论基岩油气藏的勘探前景[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 8–11+155.
Ma Long, Liu Quanxin, Zhang Jinglian, et al. A discussion of exploration potentials of basement hydrocarbon reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 8–11+155.
- [9] 周宗良, 衡海良, 党红. 国外基岩裂缝油藏实例分析与勘探前景[J]. 新疆地质, 2009, 27(3): 251–253.
Zhou Zongliang, Heng Hailiang, Dang Hong. Classic example analysis of fractured basement reservoir for abroad and exploratory prospect[J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(3): 251–253.
- [10] 杨飞, 徐守余. 全球基岩油气藏分布及成藏规律[J]. 特种油气藏, 2011, 18(1): 7–11+135.
Yang Fei, Xu Shouyu. Global distribution and hydrocarbon accumulation pattern of basement reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(1): 7–11+135.
- [11] 陈文玲, 周文. 含油气盆地重要勘探领域——基岩油气藏[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 17–24.
Chen Wenling, Zhou Wen. Important exploration areas in Petaliferous basins—The basement hydrocarbon reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(5): 17–24.
- [12] 吴伟涛, 高先志, 刘兴周, 等. 基岩油气藏的形成与分布[J]. 地质科技情报, 2014, 33(1): 107–113.
Wu Weitao, Gao Xianzhi, Liu Xingzhou, et al. Formation and distribution of basement rock reservoir[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(1): 107–113.
- [13] JAKK Landes. Petroleum resources in basement rock[J]. AAPG Bulletin, 1960, 44(10): 1682–1691.
- [14] CH P' An. Petroleum in basement rock[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(10): 1597–1643.
- [15] 邢志贵. 辽河坳陷太古宇变质岩储层研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Xing Zhigui. The study of Archeozoic metamorphic rock reservoir in Liaohe Depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [16] 周心怀, 项华, 于水, 等. 渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征及发育控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 17–20.
Zhou Xinhuai, Xiang Hua, Yu Shui, et al. Reservoir characteristics and development controlling factors of JZS Neo Archean metamorphic buried hill oil pool in Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 17–20.
- [17] 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 Dong Sheng. Fractured characteristics of metamorphic reservoirs in low buried-hill in west of Jing'anpu, Damintun depression[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 322–325.
- [18] Tong K J, Zhao C M, Lü Z B, 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.
- [19] 傅强, 游瑜春, 吴征. 曹台变质岩潜山裂缝系统形成的构造期次[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 18–20.
Fu Qiang, You Yuchun, Wu Zheng. Tectonic episodes and reservoir fissure systems in Caotai metamorphic buried hill reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 18–20.
- [20] 谢文彦, 孟卫工, 张占文, 等. 辽河坳陷古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.
- [21] 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(自然科学版), 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 buried-hills of Xinglongtai in west sag of Liaohe depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2007, 31(6): 6–9.
- [22] Meng Weigong, Chen Zhenyan, Li Pai, et al. Exploration theories and practices of buried-hill reservoirs: A case from Liaohe Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 136–143.
- [23] 庞雄奇, 谢文彦, 孟卫工等. 辽河断陷沉积岩之下0~1 600 m变质岩中大油气田的发现及其意义[J]. 地质评论, 2011, 57(4): 541–548.
Pang Xiongqi, Xie Wenyan, Meng Weigong, et al. Discovery of a large oil and gas field within metamorphic rocks 0~1600m below sedimentary rocks in Liaohe fault sepression and its significance[J]. Geological Review, 2011, 57(4): 541–548.
- [24] 高世臣, 郑丽辉, 邢玉忠. 辽河盆地太古界变质岩油气储层特征[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2): 1–4+639.
Gao Shichen, Zheng Lihui, Xing Yuzhong. Reservoir characteristics

- of Archean metamorphic rocks in Liaohe Basin[J]. Journal of oil and gas technology, 2008, 30(2): 1-4+639.
- [25] 朱毅秀, 杨程宇, 王欢. 辽河牛心坨太古界变质岩储层岩性特征与分布[J]. 石油科学通报, 2017, 2(03): 327-335.
- Zhu Yixiu, Yang Chengyu, Wang Huan. Petrological characteristics of the Archeozoic metamorphic reservoir in Niuxintuo, Liaohe Depression[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(03): 327-335.
- [26] 宋柏荣, 胡英杰, 边少之, 等. 辽河坳陷兴隆台潜山结晶基岩油气储层特征[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 77-82.
- Song Bairong, Hu Yingjie, Bian Shaozhi, et al. Reservoir characteristics of the crystal basement in the Xinglongtai buried-hill, Liaohe Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 77-82.
- [27] Cuong T X, Warren J K. Bach ho field, a fractured granitic basement reservoir, Cuu Long Basin, offshore SE Vietnam: A buried hill play[J]. Journal of Petroleum Geology, 2009, 32(2): 129-156.
- [28] Garzic E L, L' Hamaide T D, Diraison M, et al. Scaling and geometric properties of extensional fracture systems in the proterozoic basement of Yemen. Tectonic interpretation and fluid flow implications[J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33(4): 519-536.
- [29] Carvalho I D S, Mendes J C, Costa T. The role of fracturing and mineralogical alteration of basement gneiss in the oil exsudation in the Sousa Basin (Lower Cretaceous), Northeastern Brazil[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2013, 47(5): 47-54.
- [30] 查明, 郝琦, 吴孔友, 等. 辽河东部凹陷茨榆坨低位潜山油气成藏研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 1-5, 10, 146.
- Zha Ming, Hao Qi, Wu Kongfa, et al. Hydrocarbon accumulation of Ciyutuo buried hill in eastern depression of Liaohe basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2003, 27(4): 1-5, 10, 146.
- [31] 郝琦, 刘震, 查明, 等. 辽河茨榆坨潜山太古界裂缝型储层特征及其控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(3): 384-390.
- Hao Qi, Liu Zhen, Zha Ming, et al. Characters and controlling factors on the Archean fracture-type reservoirs of the Ciyutuo buried hill in the Liaohe basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(3): 384-390.
- [32] 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 Aimei, et al. Special reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [33] Sanders C A E, Fullarton L, Calvert S. Modelling fracture systems in extensional crystalline basement[M]. London: Geological Society of London Publications, 2002.

(编辑 张玉银)

(上接第1130页)

- [14] 王有功, 严萌, 郎岳, 等. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层油源断层新探[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 734-740.
- Wang Yougong, Yan Meng, Lang Yue, et al. Re-determining source faults of the Upper Cretaceous Putaohua oil layer in Sanzhao sag of Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 734-740.
- [15] 刘云燕. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层成藏条件及模式的差异性[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 616-623.
- Liu Yunyan. Differences of oil accumulation conditions and patterns in Putaohua oil layer, Sanzhao depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 616-623.
- [16] 孙雨, 马世忠, 姜洪福, 等. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层河控浅水三角洲沉积模式[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1502-1509.
- Sun Yu, Ma Shizhong, Jiang Hongfu, et al. Sedimentary mode of shallow Lacustrine Fluvial dominated delta of Putaohua reservoirs in the Sanzhao depression, Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(10): 1502-1509.
- [17] 孙雨, 赵丹, 于利民, 等. 浅水湖盆河控三角洲前缘砂体分布特征与沉积模式探讨——以松辽盆地北部永乐地区葡萄花油层为例[J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 439-447.
- Sun Yu, Zhao Dan, Yu LiMin, et al. Sandbody distribution and sedimentary model in shallow lacustrine fluvial-dominated delta front: a case study from Putaohua oil layer of Yongle area in Songliao Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3): 439-447.
- [18] 陈伟, 李鹏, 彭承文, 等. 大庆油田肇35区块葡萄花油层储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 802-809.
- Chen Wei, Li Peng, Peng Chengwen, et al. Characteristics and controlling factors of pore features in the Putaohua oil reservoir in the Block Zhao-35, Daqing oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 802-809.
- [19] 付晓飞, 宋岩. 松辽盆地三肇凹陷“T₁₁”多边断层非构造成因机制探讨[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 738-749.
- Fu Xiaofei, Song Yan. Nontectonic mechanism of polygonal “T₁₁” faults in the Sanzhao Sag of Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 738-749.
- [20] 孙雨, 马世忠, 姜洪福, 等. 三肇凹陷葡萄花油层油藏分布特征及其控制因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2387-2393.
- Sun Yu, Ma Shizhong, Jiang Hongfu, et al. Distribution characteristic-sand controlling factors for reservoirs of Putaohua oil layer in Sanzhao Sag of Songliao Basin [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2011, 42(8): 2387-2393.

(编辑 张亚雄)