

doi:10.3799/dqkx.2014.134

蓬莱 9-1 潜山岩性组成及其对储层发育的控制

李建平¹, 周心怀¹, 王国芝²

1. 中国海洋石油有限责任公司天津分公司, 天津 300452

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘要: PL9-1 潜山油藏是渤海湾盆地储量最大的古潜山油气藏之一, 探明储量过亿吨. 该油藏发育于庙西北凸起鞍部的中生界花岗岩侵入体顶部. 凸起端部变质岩中没有油气发现. 油气的分布受岩性控制明显. 综合岩心观察、薄片鉴定、X 粉晶衍射以及常量元素分析等技术手段, 通过对比不同岩石类型的矿物组成、储集空间类型及发育程度, 探讨了岩性组成对储层发育的控制作用. 研究表明, 变质岩中裂缝和孔隙均不发育, 不能形成有效储层. 花岗岩主要储集空间类型为孔隙—裂缝型, 总体具有从砂质风化带→砾质风化带→裂缝带→基岩带, 储集空间组合类型从孔隙→孔隙+裂缝→裂缝→不太发育的微裂缝的变化特征. 储层厚度大, 成层性强, 可形成有效的规模性储层. 花岗岩与变质岩的矿物组成差异控制了研究区优质储层的发育. 变质岩中长石含量极低, 不能形成溶蚀孔隙, 较高含量(30%~50%)的片状矿物使其在应力作用下易发生塑性变形, 不易产生裂缝. 花岗岩具有很高的长石含量和含量很低的片状矿物, 不仅容易被风化并产生溶蚀孔隙, 而且易于发生脆性变形形成裂缝.

关键词: 蓬莱 9-1 油藏; 变质岩; 花岗岩; 岩性组成; 储集空间.

中图分类号: TE51

文章编号: 1000-2383(2014)10-1421-10

收稿日期: 2014-04-02

Lithologic Constitution and Its Control on Reservoir Development on Penglai 9-1 Buried Hill, Bohai Sea Basin

Li Jianping¹, Zhou Xinhui¹, Wang Guozhi²

1. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: A new oil field with a reserve of more than 100 million tons has been found in the Penglai 9-1 buried hill, consisting of Paleoproterozoic metamorphic rocks and Yanshan granites. The granites surrounded by Paleoproterozoic metamorphic rocks are distributed in central valley floor of the buried hill. The oil pool mainly accumulates in the reservoirs of granite weathered crust located in the valley floor of the buried hill. The granites can be classified into granodiorite and adamellite. Paleoproterozoic metamorphic rocks mainly consist of phyllite, schist, metasandstone, quartzite and mylonite. Although both metamorphic rocks and granites have experienced similar weathering and deformation, differences in mineral constitution, mechanical property and weathering ways between metamorphic rocks and granites result in alternative development of high quality reservoirs in the granites. The reservoirs in metamorphic rocks belong to porosity types and development of secondary porosity is quite limited, no effective reservoirs may be formed in the metamorphic rocks. The reservoirs in granites are characterized by development of porosity and fissure, high quality reservoirs mainly develop in the sandy, pebbly weathering zone and fissured zone, in which the reservoirs in fissured zone are the thickest. Except for intensity of hypergenic karstification and tectonic deformation, lithologic constitution and lithofacies of the granites play a controlling role in development of high quality reservoirs in granite weathered crust. The factors such as weathered intensity, deformation, lithologic constitution and lithofacies, etc. contribute to vertical zonation characteristics of weathered crust reservoir at the granite buried hill, the reservoir types changed from porosity to fissure from the top of the weathered crust to the bottom. The various secondary porosity and fissure are the most important reservoir spaces in buried hill granite reservoirs.

Key words: Penglai 9-1 oil field; metamorphic rock; granite; lithologic constitution; reservoir.

基金项目: 国家科技重大专项(No.2011ZX05023-006-002).

作者简介: 李建平(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事地层和沉积相研究. E-mail: lij@cnoc.com.cn

结晶基岩是含油气盆地中十分重要的油气储层 (Chung-Hsiang, 1982; Khridtoforova and Khristoforov, 2006). 在世界范围内已发现的 300 余个工业性基岩油气田中, 约 40% 产于花岗岩及花岗岩潜山风化壳储层中, 其储量约占所有基岩油气田储量的 75% (Koning, 2003; Plotnikova, 2006; 李燕等, 2005; 潘建国等, 2007; 宋柏荣等, 2011; 杨飞和徐守余, 2011; 葛志丹等, 2011; 侯连华等, 2011).

变质岩和岩浆岩储层均具有很强的非均质性 (吴智勇等, 2001; 赵海玲等, 2004; 谭建忠等, 2006; 张吉光等, 2007; 陈志海等, 2009; 邓运华和彭文绪, 2009; 龚再升, 2010). 这种非均质性控制了油气藏的分布和富集程度 (龚再升, 2010; 曾选萍等, 2010; 陈文玲和周文, 2012).

PL9-1 潜山油藏位于庙西北潜山中间鞍部的花岗岩侵入体顶部. 潜山南北两端高点处的变质岩中没有发现油气. 对比花岗岩侵入体和周围变质岩的储层发育差异并分析其控制因素, 不仅有助于理解庙西北潜山油气分布格局, 而且对渤海湾盆地其他潜山的油气勘探具有重要的借鉴意义.

1 地质概况

庙西北凸起为渤海湾盆地胶辽隆起插入渤中坳陷东侧而形成的鼻状小凸起 (图 1a), 凸起南侧为断层与庙西北凹陷接触, 北侧边缘为地层超覆线 (邓运华, 2001; 周心怀等, 2010; 余一欣等, 2011) (图 1b). 新近系沉积岩地层直接超覆或披覆于潜山之上. 该潜山构造简单、完整, 面积为 156 km², 幅度为 510 m, 高点埋深为 970 m (龚再升, 2010).

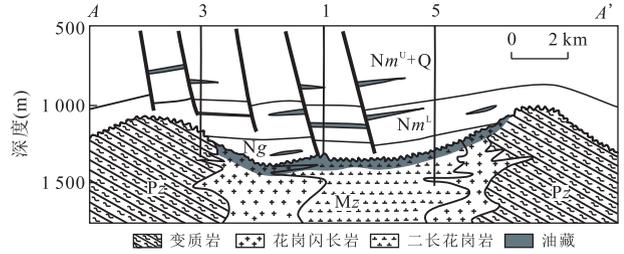


图 2 PL9-1 油藏剖面 (剖面位置见图 1)
Fig.2 Reservoir profile of the PL9-1 oil field

庙西北潜山南北发育了两个高点, 高点岩性为古元古界变质岩, 中间宽缓鞍部为中生界花岗岩侵入体, 在二者直接接触处常见花岗岩呈岩脉、岩枝状插入变质岩中 (图 2). 已有的钻井已钻遇花岗岩体厚度 139~349 m, 尚未钻穿. 受风化作用和构造因素的影响, 花岗岩潜山在垂向上具有明显的分带性. 根据花岗岩侵入体潜山垂向上的储层发育情况, 花岗岩潜山在垂向上依次可划分出砂质风化带、砾质风化带、裂缝带和基岩带. 有效储层主要分布在花岗岩体潜山顶部约 100~200 m 范围内, 呈似层状分布, 钻井揭示油层厚度 36.7~187.2 m.

2 潜山主要岩石类型及分布

根据钻井岩心、岩屑的观察与镜下鉴定, 结合 X 粉晶衍射和主量元素化学分析结果, 发现庙西北潜山的主要岩石类型为花岗岩和变质岩. 在花岗岩中偶见辉绿岩、细碧辉绿岩和煌斑岩呈脉状穿插其间.

2.1 花岗岩

由于风化程度的不同, 花岗岩侵入体在垂向上表现出由砂质风化带、砾质风化带到裂缝带和基岩

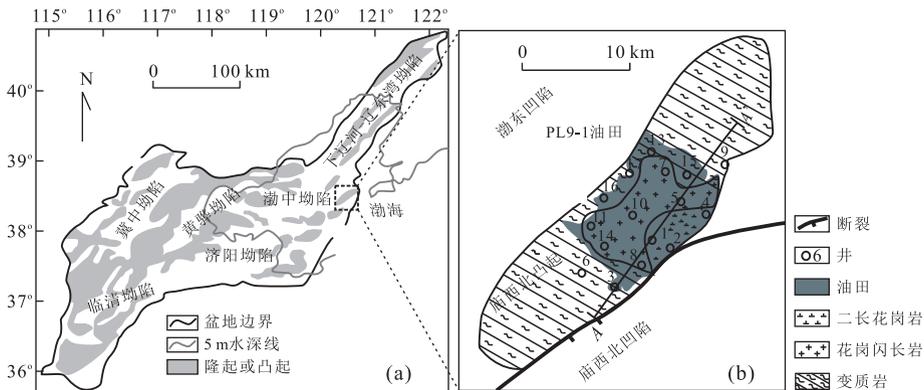


图 1 研究区位置与地质要素
Fig.1 Location and geological elements of the study area
a. 研究区位置; b. 研究区岩性、油藏与井位分布

带花岗岩结构渐趋明显的特征.砂质风化层中,岩石遭受了强烈的蚀变,多成细小的碎屑颗粒存在,绝大部分已裂解为石英、长石和粘土矿物,花岗结构基本消失,仅从一些碎屑残留的结构可以推知其为花岗岩.处于裂缝层和基岩层中的花岗岩,基本保留了花岗岩的结构和矿物组成(图 3,4).

选择蚀变较弱或未蚀变的代表性岩心、岩屑样品,在常规的显微岩矿鉴定基础上,利用 X 粉晶衍射和常量元素化学分析结果,采用 CIPW 计算方法确定理想的矿物组成,利用花岗岩的分类判别图解,确定出潜山花岗岩以花岗闪长岩为主,其次为二长花岗岩、偶尔可见少量钾长花岗岩.

2.1.1 花岗闪长岩 研究区花岗闪长岩呈灰白色,局部有钾化的地方显示为红色斑块,具有块状构造和半自形粒状结构(图 3).部分岩心和岩屑样品具有明显的高岭土化和钾化.X 粉晶衍射结果显示研究区花岗闪长岩主要矿物组成为斜长石、钾长石、石英、角闪石和黑云母.暗色矿物以角闪石为主,黑云母次之.总的来看,斜长石占 40%~55%、钾长石占 10%~15%、石英占 20%、暗色矿物小于 10%、其他约占 5%.斜长石多为 An 10~45 的更长石、中长石,聚片双晶发育,常见中性长石环带结构(图 4a).利用主量元素化学分析结果,采用 CIPW 标准矿物计算出的钾长石含量介于 14.90%~27.28%之间,斜长石的含量为 41.18%~59.48%,石英含量为 10.70%~36.03%.采用该方法计算出的钾长石含量总体高于通过粉晶

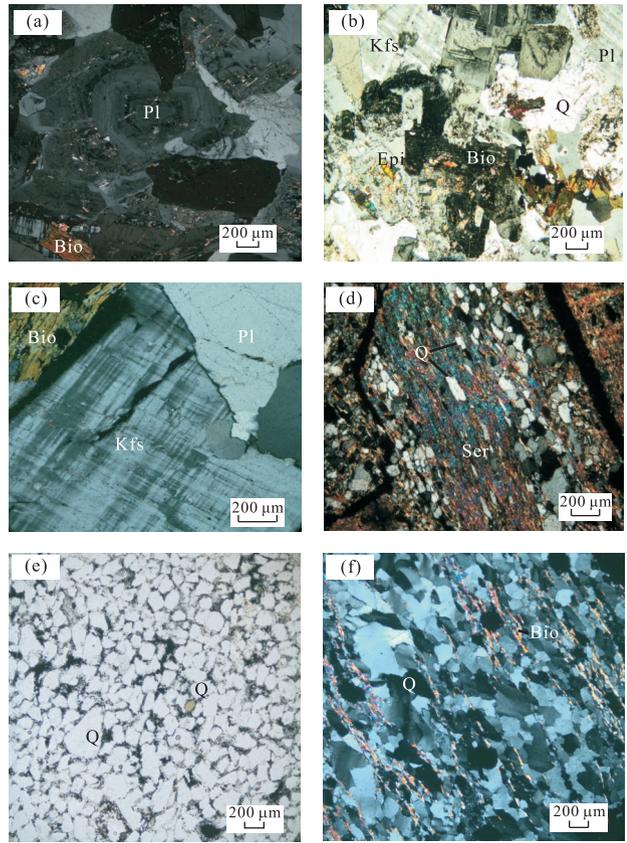


图 4 PL9-1 油藏典型岩石薄片镜下照片

Fig.4 Microscopic photographs of typical rock in reservoir of the PL9-1 oil field

a.花岗闪长岩及其斜长石中的环带构造;b.二长花岗岩;c.钾长花岗岩;d.绢云千枚岩;e.变质砂岩和变余砂状结构;f.云母石英片岩.Q.石英;Kfs.钾长石;Pl.斜长石;Bio.黑云母;Ser.绢云母;Epi.绿帘石

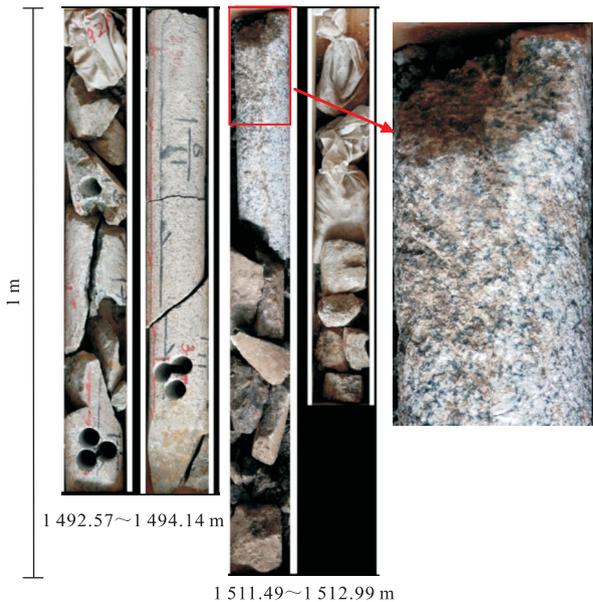


图 3 13 井花岗闪长岩岩心照片

Fig.3 Core photos of the granodiorite in well 13

衍射测试获得的钾长石含量(图 5).研究区花岗闪长岩主要分布在花岗岩侵入体中西部的 5、7、8、10、11、13、14、15、16、17 井区(图 5,图 1b,图 2).

2.1.2 二长花岗岩 研究区二长花岗岩呈灰白色,块状构造,具花岗结构和二长结构(图 6).岩石主要矿物组成为斜长石、钾长石、石英、黑云母和角闪石.暗色矿物主要为深棕绿—浅黄绿色的黑云母,且多发生绿泥石化,偶见白云母.总的来看,由粉晶衍射和 CIPW 计算出的矿物组成基本一致(图 5),斜长石 23%~56%、钾长石 20%~26%、石英 14%~48%,绝大多数样品的石英含量介于 20%~30%之间(图 5),石英含量超过 35%的样品应当是硅化作用的结果.暗色矿物含量低于花岗闪长岩.研究区二长花岗岩主要分布在花岗岩侵入体东部的 1、2、4 井区(图 5,图 1b,图 2).

2.1.3 钾长花岗岩 研究区钾长花岗岩呈肉红色或浅红色,具块状构造和半自形等粒结构.钾长花岗

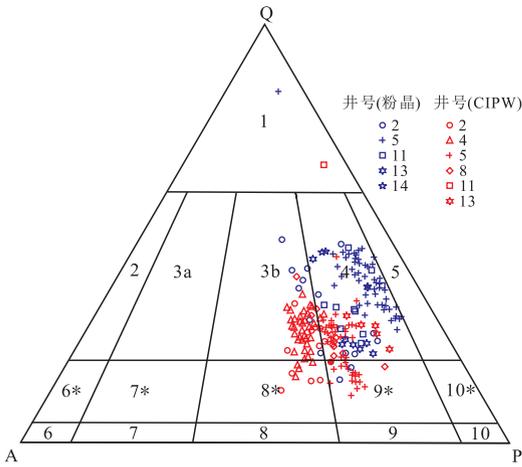
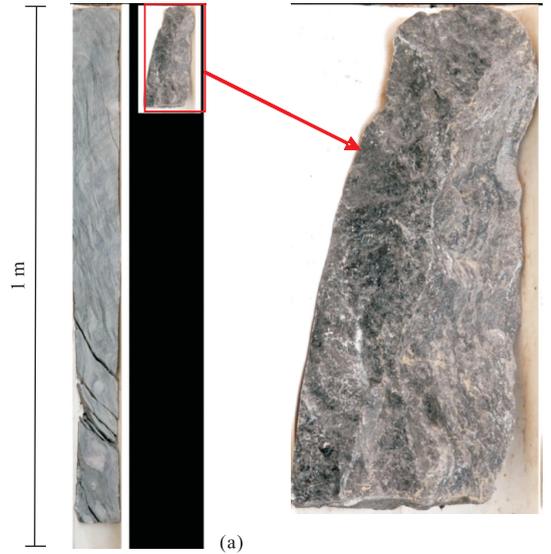


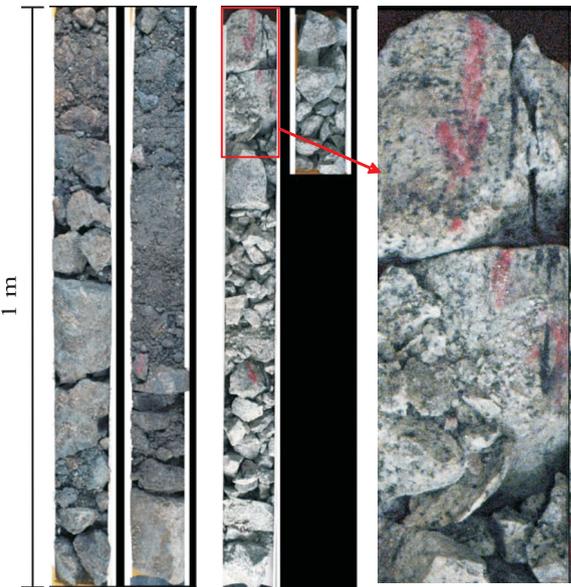
图 5 潜山岩石的 QAP 图解

Fig.5 QAP diagram of rocks from the buried hill

1.富石英花岗岩;2.碱长花岗岩;3a.花岗岩;3b.花岗岩(二长花岗岩);4.花岗闪长岩;5.英云闪长岩、斜长花岗岩;6*.碱长石英正长岩;7*.石英正长岩;8*.石英二长岩;9*.石英二长闪长岩;10*.石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩



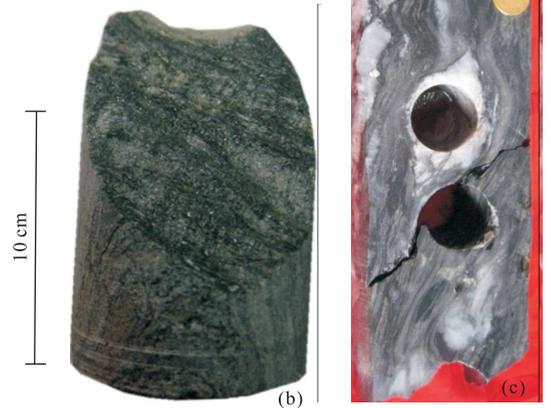
1 297.98~1 299.17 m



1 286~1 288 m 1 438.00~1 439.25 m

图 6 2 井二长花岗岩岩心照片

Fig.6 Core photos of the monzogranite in well 2



1 308.5 m

1 297.30 m

图 7 6 井各种变质岩岩心照片

Fig.7 Core photos of the metamorphic in well 6

a.石英片岩;b.黑云母片岩;c.糜棱岩

岩主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母和角闪石组成.其中钾长石占 42%~58%,斜长石占 7%~23%,石英占 30%左右,暗色矿物的含量在 5%左右.钾长石主要为具有格子双晶的微斜长石,蚀变明显弱于斜长石;斜长石具有聚片双晶,不具有花岗闪长岩的环带结构.钾长花岗岩常呈岩脉或岩株状侵位于花岗闪长岩和二长花岗岩中,其规模较小,仅在个别井中的一些井段内发现.

2.2 变质岩类

潜山上的变质岩主要为千枚岩、片岩、石英岩、变质砂岩和少量动力变质岩.

2.2.1 千枚岩 千枚岩为研究区较为常见的区域变质岩,岩石具有显微粒状鳞片变晶结构(图 4d)、千枚状构造.鳞片状矿物主要为细小的绢云母(40%~60%)、黑云母(5%~20%)和极少量的绿泥石(0%~5%)构成.粒状矿物主要为石英(20%~40%)和斜长石(0%~10%).根据矿物组成的不同,可以进一步细分为:绢云母千枚岩和石英千枚岩.

2.2.2 片岩类 片岩类岩石常具有鳞片变晶结构或者粒状鳞片变晶结构、片状构造(图 4f).岩石主要

由细小的黑云母、白云母、石英和少量斜长石组成。云母类矿物含量在 30%~60% 之间不等,云母定向排列形成片理。该类岩石中根据云母的种类和石英含量的不同,可进一步划分出:二云母片岩、黑云母片岩及云母石英片岩(图 7a,7b)。

2.2.3 石英岩 具有等粒粒状变晶结构、块状构造。岩石主要由石英组成,含极少量绢云母或白云母。石英粒度为 0.1~0.2 mm,可见典型的三边结构。

2.2.4 变质石英砂岩 该类岩石以变余砂状结构为特征(图 4e),主要由石英(85%~90%)、绢云母、黑云母(10%~15%)和石墨(0%~3%)构成,变余碎屑颗粒石英大小不等。原砂岩中的杂基已全部转变为绢云母、黑云母和石墨。原始粒间孔隙已全部消失。当变质强度增强,原岩的结构消失时,该类岩石就过渡为石英岩。

2.2.5 动力变质岩类 在潜山变质岩中,常可见由韧性剪切变形形成的糜棱岩。这类岩石中石英脉特别发育,呈透镜体状或石香肠状的石英脉会构成明显的不对称旋转构造(图 7c)。碎斑矿物主要为石英,多被拉长呈不对称状,具有略微定向性,波状消光,含亚颗粒的碎斑和边缘动态重结晶新生颗粒组成的核幔结构。碎基包绕碎斑或碎基包绕透镜状石英脉显示出强烈的塑性流动特征。动态重结晶作用强烈时,可见石英等矿物被明显拉长定向。

3 潜山储层主要储集空间类型

前人研究表明,潜山基岩储层大多属于孔洞—裂缝型储层(吴智勇等,2001;马龙等,2006;张吉光等,2007;龚再升,2010;曾选萍等,2010;张攀等,2011)或风化壳型(赵海玲等,2004;谭建忠等,2006;陈志海等,2009;邓运华和彭文绪,2009;龚再升,2010)。虽然研究区潜山花岗岩和变质岩均经历过长期的风化剥蚀,形成了厚薄不等的风化壳,但由于变质岩和岩浆岩矿物组成和岩性上的差异、成岩方式的差异造成两类岩石抗风化的程度不同,相应地所形成的风化壳型储集空间类型也明显不同。

3.1 变质岩中储集空间类型

国内已发现的变质岩基岩储层,均具有特低孔隙度和特低渗透率特征,变质岩的渗透率大多低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,次生裂缝是变质岩储层的主要储集空间和运移通道,局部所发育的次生溶孔为次要储集空间(吴智勇等,2001;王志红,2006;赵立旻,2007)。研究区内的变质岩比花岗岩抗风化,风化壳发育程

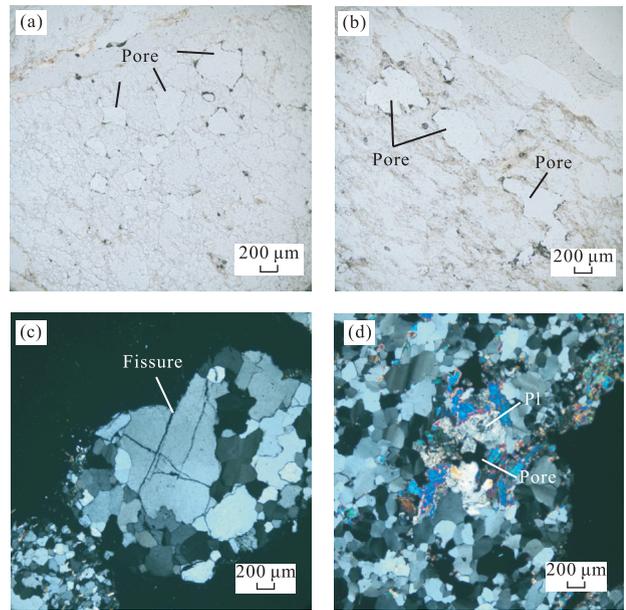


图 8 变质岩中的次生孔隙和裂缝

Fig.8 Secondary pores and fissures developing in the metamorphic rocks

a. 变质砂岩中的次生溶孔; b. 片岩中的次生溶孔; c. 石英岩中的显微裂缝; d. 斜长石蚀变形成的次生溶孔,斜长石蚀变成高岭土和绢云母、蚀变强烈部位形成溶孔

度很低,风化作用以物理风化为主,化学风化作用不强烈。风化壳下的变质岩中裂缝不发育。与已发现的其他潜山变质岩储层所不同的是,研究区变质岩储层储集空间类型主要为次生溶孔,少见裂缝。次生溶孔在岩石中的分布极不均匀,面孔率约 1%~2%,主要发育于片岩、千枚岩和变质砂岩中,偶尔也见于糜棱岩中(图 8)。

研究发现,上述各种变质岩中的次生溶孔主要由斜长石蚀变后所形成(图 8d),次生溶孔的分布主要受岩石中斜长石控制。孔隙类型主要为斜长石的铸模孔和超大溶孔。溶孔有的沿顺片理、千枚理、糜棱叶理方向断续分布,也有的随机杂乱分布。由于垂向上岩性变化频繁,溶蚀作用又是选择性地进行,因而,很难形成较厚的储层。虽然部分变质岩受到了强烈的构造作用,但是变质岩中的裂缝极不发育,仅在部分矿物颗粒中见到少量显微裂缝,这些裂缝仅限于矿物颗粒内部并未穿切整个岩石(图 8c),缺少必要的连通作用。

总之,变质岩中储层不发育,储集空间主要是局部发育的次生溶孔为主,次生溶孔是否发育主要受片岩、千枚岩和糜棱岩中斜长石的含量所控制。

3.2 花岗岩中储集空间类型

与国内外其他风化壳型花岗岩储层相似,研究

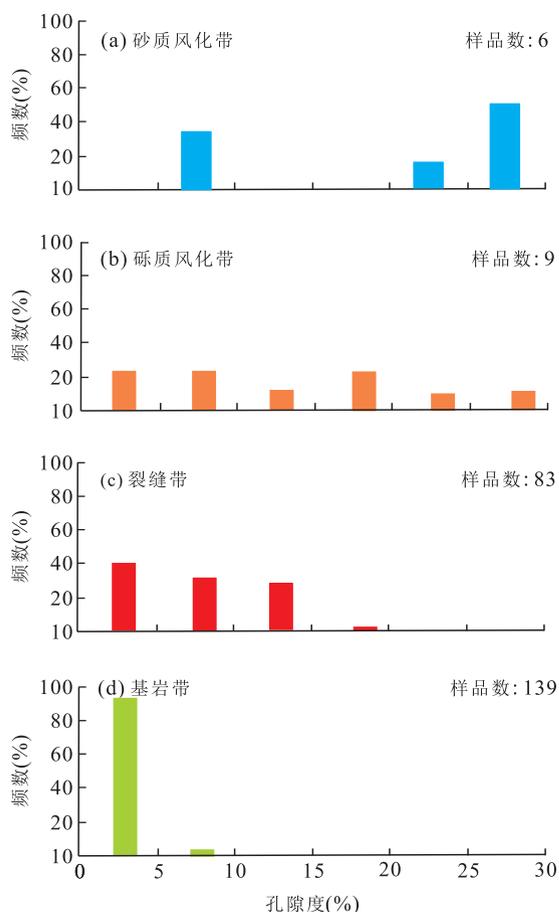


图 9 各风化壳亚带储层孔隙度分布直方图

Fig.9 Distribution histogram of reservoir porosity in different sub-zone of weathering crust

区潜山花岗岩储层具孔、缝双介质的特征。受风化淋滤作用影响形成孔隙型储层,孔隙类型以粒(砾)间孔、晶内溶孔和砾(粒)内溶孔为主;受构造作用影响形成裂缝型储层,常见裂缝类型为微裂缝、晶内显微裂缝和砾内显微裂缝。不同风化壳亚带由于风化作用的强度、构造变形的强度和方式的不同,可形成不同类型的溶孔、裂缝组合体,从而使风化壳储层表现出明显的分带性。

研究表明,砂质风化带的储集空间类型以粒间孔为主,偶见粒内显微裂缝和粒内溶孔。砾质风化带储集空间类型主要为孔隙和裂缝,孔隙包括粒(砾)间孔、晶内溶孔和砾(粒)内溶孔,裂缝包括砾内显微裂缝和水平微裂缝。发育于风化壳下的裂缝带以微裂缝、晶内显微裂缝为主要储集空间,晶内溶孔的发育受裂缝控制显著,发育程度较低。

不同带内次生溶孔的发育存在明显的差异性,以砂质风化带和砾质风化带次生溶孔最为发育(图 9)。砂质风化带孔隙度集中在 20%~30%之间,最大

孔隙度 27.30%,平均 19.27%,说明该带孔隙型储集空间非常发育,为最好的储集层。尽管砂质风化带厚度较小(最厚处约 20 m,图 10a),但这样的储层往往可以形成较高的单井产能。砾质风化带孔隙度变化较大,但近一半样品集中在 15%以上,最高 27.50%,平均 13.07%,考虑到该带中水平微裂缝发育特征,表明砾质风化带为优质的孔隙—裂缝型储集层。砾质风化带虽然储集物性不及砂质风化带,但其拥有相对较大的厚度(最厚可达 50 m,图 10b),仍是该油田最重要的储层。裂缝带孔隙度最高达到 15.90%,平均 6.99%,孔隙度较低,但该带裂缝极为发育,说明该带的储集空间类型已经由孔隙转变为裂缝。虽然裂缝带孔隙度低,但该带厚度很大,最厚可达 200 m(图 10c),其总体规模也十分可观。基岩带新鲜花岗岩极为致密,孔隙度几乎全部低于 5%,最高仅为 11.60%,平均 2.17%;这些不太发育的孔隙大都集中于微裂缝附近。孔隙度呈由砂质风化带向基岩带逐渐变小的特征(图 9),其主要受风化作用的强度控制,风化越强孔隙度越发育。

总之,庙西北潜山花岗岩主要储集空间类型为孔隙—裂缝型,总体具有从砂质风化带→砾质风化带→裂缝带→基岩带,储集空间组合类型从孔隙→孔隙+裂缝→裂缝→不太发育的微裂缝的变化特征。

4 岩性对储层发育的控制作用

研究区的变质岩和花岗岩具有相似的构造背景和风化环境,但储层物性相差甚大,变质岩中储层不发育,主要的储集空间发育于花岗岩风化壳中。究其根本原因就在于变质岩和花岗岩的岩性和矿物组成上的差异。

4.1 岩性组成对风化作用的控制

如前所述,研究区各种变质岩中裂缝和次生溶孔发育程度都很低。这主要是由其矿物组成决定的。变质岩中相对较高的云母含量和很低的长石含量决定了这些变质岩既难发生物理风化也难发生化学风化。较高的云母矿物含量使得这些岩石具有一定的韧性和塑性,很难发生大规模碎裂。次生溶孔大多是长石蚀变后所形成的孔隙(图 8d)(邓运华和彭文绪,2009;张攀等,2011)。研究区变质岩中长石矿物含量很低,且裂缝不发育阻止了大气淡水与岩石的相互作用,因此,化学风化作用也很难进行。

花岗岩的主要矿物组成为:长石(60%~75%)、

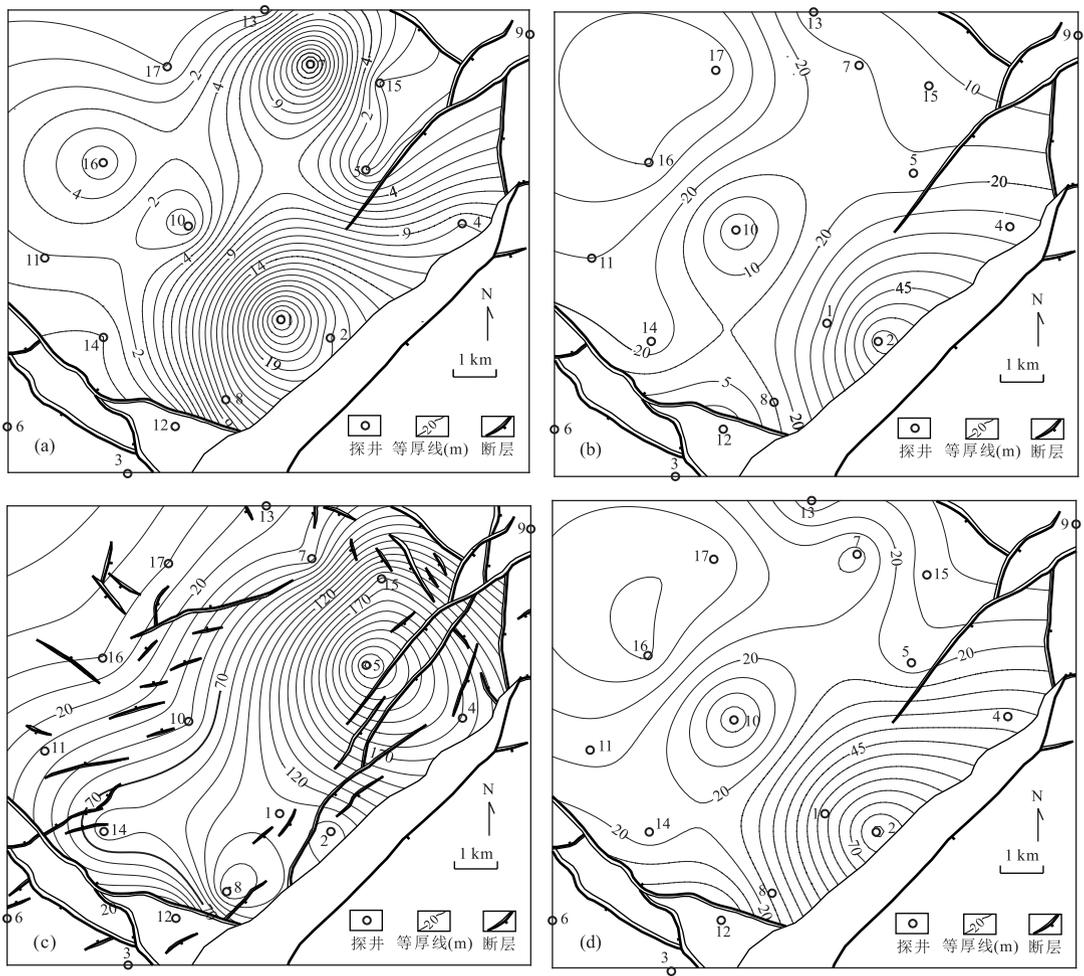
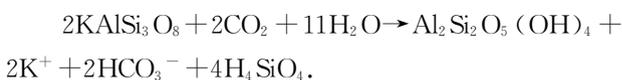
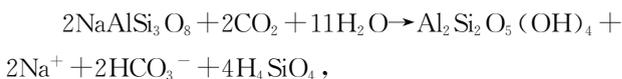


图 10 花岗岩基岩储层厚度平面分布

Fig.10 Isopach map of the reservoir thickness in the granite basement rocks

a.砂质带储层厚度;b.砾质带储层厚度;c.裂缝带储层厚度;d.砂质带+砾质带+裂缝带储层厚度

石英(20%~30%)、黑云母和少量角闪石(5%~10%),长石是花岗岩的重要组成矿物,长石的解理和双晶缝发育,且长石是脆性矿物,因此在受构造应力作用后比前述的片岩、千枚岩更易于形成微裂缝或显微裂缝。当花岗岩被剥露于地表时,会发生物理和化学风化作用,物理风化作用使岩石破碎崩解成大小不等的碎屑颗粒或岩块。弱酸性的大气淡水常沿解理缝、双晶缝、(显)微裂缝导入,与长石发生充分的水岩反应。黑云母和角闪石通常发生绿泥石化或转变成粘土矿物,而钾长石和斜长石则极易发生如下反应:



当沿双晶缝方向溶蚀时,常形成一组相互平行

的不连续的溶蚀缝,或者沿缝加大溶蚀,随着长石风化程度的提高,使得这种溶蚀缝的连续性、宽度、不规则性均提高。当沿解理缝和裂缝溶蚀时,常在长石内部形成晶内溶孔或不规则串珠状溶孔。笔者在镜下观察发现,角闪石也极易蚀变成绿泥石,沿角闪石解理缝溶蚀形成线状溶缝。虽然花岗岩中的黑云母远没有变质岩中丰富,但有意思的是,花岗岩中的黑云母远较片岩、千枚岩中的黑云母更易蚀变成绿泥石,偶尔也可见晶内次生溶孔,当长石全部转变为粘土矿物后,常被下渗的大气水或地表水带走,不易蚀变的石英则残留下来,从而构成砂状结构形成粒间孔隙。当溶蚀作用不彻底时,在长石的受溶蚀部位常形成次生溶孔。由于变质岩和岩浆岩的岩性差异和抗风化强度的差异,使得花岗岩受风化剥蚀作用后形成负地形,北东侧和南西侧的变质岩抗风化作用强烈,形成山脊。

通过对花岗岩侵入体不同钻井的各种测井曲线、岩心和岩屑的综合观察分析,确定了各单井不同风化带内储层的发育厚度,在此基础上获得各风化带的储层的平面厚度分布(图 10)。对比研究区内不同花岗岩之间的风化壳带储层厚度可以看到,二长花岗岩岩性发育区的风化壳带储层厚度明显较厚。二长花岗岩发育区的 1、2、4 井砂质风化带储层厚度整体上明显高于花岗闪长岩发育区的各井厚度。这可能是由于二长花岗岩具有相对较高的长石含量,更易被风化所致;也有可能和二长花岗岩位于相对构造高部位有关。

4.2 岩性组成对裂缝发育的控制

研究区花岗岩侵入体与周围的变质岩为侵入接触关系,具有相同的构造应力背景。研究区处在中国东部中生代以来频繁活动的郯庐断裂带上,变质岩和花岗岩均经历了多期不同性质的构造应力作用。研究区的变质岩虽然受到强烈的应力作用,但由于大部分岩石中含有 30%~50%不等的片状矿物,它们在应力作用下易发生塑性变形,将应力消减掉,不易产生裂缝。构成岩石的主要矿物石英虽然在应力作用下易发生破碎,但当有少量流体存在时或在深部构造环境中,大多以塑性变形为主,发生拉长定向。此时石英可能也会形成粒内显微裂缝,但这些裂缝仅限于粒内而无法形成贯通性微裂缝(图 8c)。变质岩的这种岩性组成决定了其中很难形成裂缝。花岗岩中的主要矿物为长石、石英,它们都是脆性矿物,当它们受到应力作用时缺少类似于变质岩中的片状矿物来吸收和消减应力,易于发生脆性变形形成裂缝。

另外,花岗岩区各井裂缝带厚度有高有低,高低之间没有明显的岩性差别。东部主断裂附近和断裂较密集的 5 井周围裂缝带厚度最大,远离主断裂裂缝带厚度明显减小(图 10c),因而,裂缝带的厚度受断裂控制作用明显(图 10c)。

从前面的论述中可以看出,花岗岩无论是矿物组成还是力学性质上都比片岩、千枚岩更易于形成优质储层。这也是为何优质储层主要发育于花岗岩中的根本原因。

5 结论

(1)庙西北潜山主要由中生代花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩,古元古代千枚岩、片岩、变质砂岩、石英岩和动力变质岩构成。花岗岩与变质岩间为

侵入接触关系。

(2)变质岩中裂缝不发育,只发育极少量的溶蚀孔隙,不能形成规模性有效储层。花岗岩主要储集空间类型为孔隙—裂缝型,总体具有从砂质风化带→砾质风化带→裂缝带→基岩带,储集空间组合类型从孔隙→孔隙+裂缝→裂缝→不太发育的微裂缝的变化特征。花岗岩储层厚度大,成层性强,可形成有效的规模性储层。

(3)花岗岩与变质岩在矿物组成、力学性质和风化作用方式上的差异控制了研究区优质储层的发育。各种变质岩虽然受到强烈的应力作用,但由于大部分岩石中含有 30%~50%不等的片状矿物,它们在应力作用下易发生塑性变形,将应力消减掉,不易产生裂缝。变质岩中长石含量很低,也不易风化和产生次生溶孔。花岗岩中长石含量很高,容易被风化并产生溶蚀孔隙。由于组成花岗岩的主要矿物长石和石英都是脆性矿物,当它们受到应力作用时缺少类似于变质岩中的片状矿物来吸收和消减应力,易于发生脆性变形形成裂缝。

References

- Chen, W. L., Zhou, W., 2012. Important Exploration Areas in Petaliferous Basins—The Basement Hydrocarbon Reservoirs. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 34(5): 17—24 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. H., Mu, Z. B., Sun, Y., 2009. Characteristics and Development Strategy of Fracture-Cavern Basement Oil Reservoir in White Tiger Field, Vietnam. *Sino-Global Energy*, 14(9): 45—49 (in Chinese with English abstract).
- Chung-Hsiang, P., 1982. Petroleum in Basement Rocks. *AAPG Bulletin*, 66: 1597—1643.
- Deng, Y. H., 2011. Control of the Neotectonism along Tancheng-Lujiang Fracture Zone on Hydrocarbon Accumulation in the Eastern Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(5): 301—305 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Y. H., Peng, W. X., 2009. Discovering Large Buried-Hill Oil and Gas Fields of Migmatitic Granite on Jinzhou 25-1S in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 21(3): 145—156 (in Chinese with English abstract).
- Ge, Z. D., Wang, X. Z., Zhu, M., et al., 2011. Reservoir Characteristics of Archean Magmatic Rocks in Dongying Sag. *Lithologic Reservoirs*, 23(4): 48—52 (in Chinese with English abstract).

- Gong, Z. S., 2010. Continued Exploration of Granitic-Reservoir Hydrocarbon Accumulations in China Offshore Basins. *China Offshore Oil and Gas*, 22(4): 213—220 (in Chinese with English abstract).
- Hou, L. H., Wang, J. H., Zou, C. N., et al., 2011. Controlling Factors of Weathering Volcanic Reservoir; An Example from the Carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 559—566 (in Chinese with English abstract).
- Khridtoforova, N. N., Khristoforov, A. V., 2006. Fluid Migration and Location of Fractured Layers in the Crystalline Basement by Temperature Logging in the Volga Region, Russia. *Journal of Geochemical Exploration*, 89(1—3): 187—190. doi:10.1016/j.gexplo.2005.11.074
- Koning, T., 2003. Oil and Gas Production from Basement Reservoirs; Examples from Indonesia, USA and Venezuela. *Geological Society of London, Special Publication*, 214(1): 83—92. doi:10.1144/GSL.SP.2003.214.01.05
- Li, Y., Yue, D. L., Wu, S. H., 2005. Reservoir Spaces and Influence Factors on Lower Palaeozoic Reservoir in Zhuangxi Buried-Hill. *Journal of Oil and Gas Technology*, 27(5): 694—698 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L., Liu, Q. X., Zhang, J. L., et al., 2006. A Discussion of Exploration Potentials of Basement Hydrocarbon Reservoir. *Natural Gas Industry*, 26(1): 8—11 (in Chinese with English abstract).
- Pan, J. G., Hao, F., Zhang, H. Q., et al., 2007. Formation of Granite and Volcanic Rock Reservoirs and Their Accumulation Model. *Natural Gas Geoscience*, 18(3): 380—385 (in Chinese with English abstract).
- Plotnikova, I. N., 2006. Nonconventional Hydrocarbon Targets in the Crystalline Basement, and the Problem of the Recent Replenishment of Hydrocarbon Reserves. *Journal of Geochemical Exploration*, 89(1—3): 335—338. doi:10.1016/j.gexplo.2005.12.012
- Song, B. R., Hu, Y. J., Bian, S. Z., et al., 2011. Reservoir Characteristics of the Crystal Basement in the Xinglongtai Buried-Hill, Liaohe Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1): 77—82 (in Chinese with English abstract).
- Tan, Z. J., Xiang, H., Liu, F. K., et al., 2006. Testing Techniques for Complex Reservoirs and Their Application in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 18(4): 223—228 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., 2006. Comprehensive Evaluation for Fracture-Cavity Reservoirs in Damintun Sag. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 13(1): 30—31 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. Y., Guo, J. H., Wu, D. S., 2011. Fractured Characteristics of Metamorphic Reservoirs in Low Buried-Hill in West of Jing'anpu, Damintun Depression. *Oil & Gas Geology*, 22(4): 322—325 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Xu, S. Y., 2011. Global Distribution and Hydrocarbon Accumulation Pattern of Basement Reservoirs. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 18(1): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y. X., Zhou, X. H., Xu, C. G., et al., 2011. Characteristics and Formation Mechanisms of the Cenozoic Faults in the Bohai Sea Waters. *Oil & Gas Geology*, 32(2): 273—279 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, X. P., Mao, L., Wang, Y. J., et al., 2010. Buried Hill Lithology Identification and Reservoir Quality Forecast in Bonan Low Uplift. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 17(3): 27—30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. G., Wang, J. K., Qin, L. B., et al., 2007. Characteristics of Metamorphic Buried Hill Reservoir in Sude'erte of Beir Fault Depression in Hailar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 28(4): 21—25, 30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Hu, M., He, B., et al., 2011. Analysis on Main Controlling Factors of Archaeozoic Base Rock Reservoir in Dongying Depression. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 18(1): 18—21 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. L., Liu, Z. W., Li, J., et al., 2004. Petrologic Characteristics of Igneous Rock Reservoirs and Their Research Orientation. *Oil & Gas Geology*, 25(6): 609—613 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. M., 2007. Characteristics and Controlling Factors of Fracture in Buried Hill in Damintun Sag, Liaohe Basin. *Geological Science and Technology Information*, 26(4): 37—41 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Yu, Y. X., Tang, L. J., et al., 2010. Cenozoic Offshore Basin Architecture and Division of Structural Elements in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 22(5): 285—289 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈文玲, 周文, 2012. 含油气盆地重要勘探领域——基岩油气藏. 西南石油大学学报(自然科学版), 34(5): 17—24.
- 陈志海, 牟珍宝, 孙钰, 2009. 越南白虎油田缝洞型基岩油藏特征与开发对策. 中外能源, 14(9): 45—49.
- 邓运华, 2001. 郑庐断裂带新构造运动对渤海东部油气聚集的控制作用. 中国海上油气(地质), 15(5): 301—305.
- 邓运华, 彭文绪, 2009. 渤海锦州 25-1S 混合花岗岩潜山大油

- 气田的发现.中国海上油气,21(3):145—156.
- 葛志丹,王兴志,朱萌,等,2011.东营凹陷太古界岩浆岩储层特征研究.岩性油气藏,23(4):48—52.
- 龚再升,2010.继续勘探中国近海盆地花岗岩储层油气藏.中国海上油气,22(4):213—220.
- 侯连华,王京红,邹才能,等,2011.火山岩风化体储层控制因素研究——以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例.地质学报,85(4):559—566.
- 李燕,岳大力,吴胜和,2005.桩西下古生界潜山油藏储集空间类型及其控制因素.石油天然气学报,27(5):694—698.
- 马龙,刘全新,张景廉,等,2006.论基岩油气藏的勘探前景.天然气工业,26(1):8—11.
- 潘建国,郝芳,张虎权,等,2007.花岗岩和火山岩油气藏的形成及其勘探潜力.天然气地球科学,18(3):380—385.
- 宋柏荣,胡英杰,边少之,等,2011.辽河坳陷兴隆台潜山结晶基岩油气储层特征.石油学报,32(1):77—82.
- 谭忠健,项华,刘富奎,等,2006.渤海复杂油气藏测试技术研究及应用效果.中国海上油气,18(4):223—228.
- 王志红,2006.大民屯凹陷缝洞性储层综合评价方法研究.特种油气藏,13(1):30—31.
- 吴智勇,郭建华,吴东胜,2001.大民屯陷静安堡西侧低潜山变质岩储层裂缝发育特征.石油与天然气地质,22(4):322—325.
- 杨飞,徐守余,2011.全球基岩油气藏分布及成藏规律.特种油气藏,18(1):7—12.
- 余一欣,周心怀,徐长贵,等,2011.渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制.石油与天然气地质,32(2):273—279.
- 曾选萍,茆利,王玉静,等,2010.渤南低凸起潜山岩性识别及储集性能预测.特种油气藏,17(3):27—30.
- 张吉光,王金奎,秦龙卜,等,2007.海拉尔盆地贝尔断陷苏德尔特变质岩潜山油藏特征.石油学报,28(4):21—25,30.
- 张攀,胡明,何冰,等,2011.东营凹陷太古界基岩储层主控因素分析.断块油气田,18(1):18—21.
- 赵海玲,刘振文,李剑,等,2004.火成岩油气储层的岩石学特征及研究方向.石油与天然气地质,25(6):609—613.
- 赵立旻,2007.大民屯凹陷古潜山裂缝特征及控制因素.地质科技情报,26(4):37—41.
- 周心怀,余一欣,汤良杰,等,2010.渤海海域新生代盆地结构与构造单元划分.中国海上油气,22(5):285—289.