

渤海海域蓬莱9-1花岗岩潜山大型 油气田储层发育特征与主控因素

王 昕¹,周心怀¹,徐国胜²,刘朋波¹,高坤顺¹,官大勇¹

[1. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司,天津 300452; 2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610059]

摘要:蓬莱9-1油田是近年来中国近海首次发现的一个以中生代花岗岩潜山风化壳为储层的大型油气田。在花岗岩潜山这个新的勘探领域,储层特征及储层形成机理条件是制约高效勘探的关键。通过镜下薄片鉴定、扫描电镜分析、矿物X-衍射分析、岩心与岩屑录井、测井曲线等资料综合分析,认为由表及里随着风化淋滤作用的逐渐减弱,蓬莱9-1花岗岩潜山可以划分为土壤带、砂-砾质风化带、裂缝带和基岩带,储集空间由孔隙型—裂缝—孔隙型—孔隙—裂缝型—裂缝型呈现有规律的变化。花岗岩潜山储层发育主要受表生岩溶作用、有机酸溶蚀作用、构造变形作用及微古地貌作用共同控制。这个认识对中国燕山期侵入的花岗岩潜山风化壳油气勘探开发具有借鉴意义。

关键词:风化壳;花岗岩潜山;燕山期;蓬莱9-1油田;渤海海域

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of reservoirs in Penglai 9-1 large-scale oilfield in buried granite hills, Bohai Sea

Wang Xin¹, Zhou Xinhui¹, Xu Guosheng², Liu Pengbo¹, Gao Kunshun¹, Guan Dayong¹

(1. Tianjin Branch, CNOOC, Tianjin 300452, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Penglai 9-1 oilfield has been the first large-scale field found in weathering crust reservoirs of the Mesozoic buried granite hills in coast waters of China in recent years. In this brand new area of exploration, reservoir characterization and its forming mechanism are considered essential for efficient and successful exploration. Thin section, SEM, and clay mineral X-diffraction analyses were combined with logging data to provide insight into uncertainties of the area. The results show that the buried granite hills can be divided into soil zone, sand-conglomerate weathering zone, fracture zone and base rock zone, and reservoiring space in them changes in a regular pattern from pore to fracture-pore, pore-fracture and fracture, from the surface to the center as weathering and leaching gradually weaken. Horizontally, granite reservoirs are continuously and widely distributed and paralleled to the top of the buried hills. Thicker reservoirs are mainly developed near large-scale faults with intensive activities and paleogeomorphic slope areas. The paper proposes that the reservoirs were controlled mainly by epigenic karstification, organic acid dissolution, structural deformation and micro-paleogeomorphology. The significance of the understanding may be felt in the future exploration and development of oil and gas in weathering crust reservoirs of buried granite hills intruded during Yanshan period.

Key words: weathering crust, buried granite hill, Yanshanian, Penglai 9-1 oilfield, Bohai Sea

渤海海域燕山期侵入的花岗岩潜山有着极大的勘探潜力,其中蓬莱9-1油田是目前国内发现的最大的花岗岩潜山油藏,钻探19口井,落实探明石油地质储量 $1.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前世界上仅委内瑞拉的拉帕兹油田、越南的白虎油田等花岗岩潜山油藏可与之媲美^[1-5]。但该花岗岩潜山岩性、储层孔隙结构与储集物性、储层发育程度与主控因素较为复杂,曾一度困扰潜山勘探决

策。笔者通过分析花岗岩潜山油藏储层特征及控制因素,为类似花岗岩潜山勘探及后续开发提供参考。

1 区域地质概况

蓬莱9-1油田位于渤海湾海域庙西北凸起上,被富烃的渤东凹陷和庙西北洼夹持(图1),南距蓬莱

收稿日期:2014-01-17;修订日期:2014-12-20。

第一作者简介:王昕(1972—),男,高级工程师,石油地质。E-mail: wangxin5@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05023-002)。

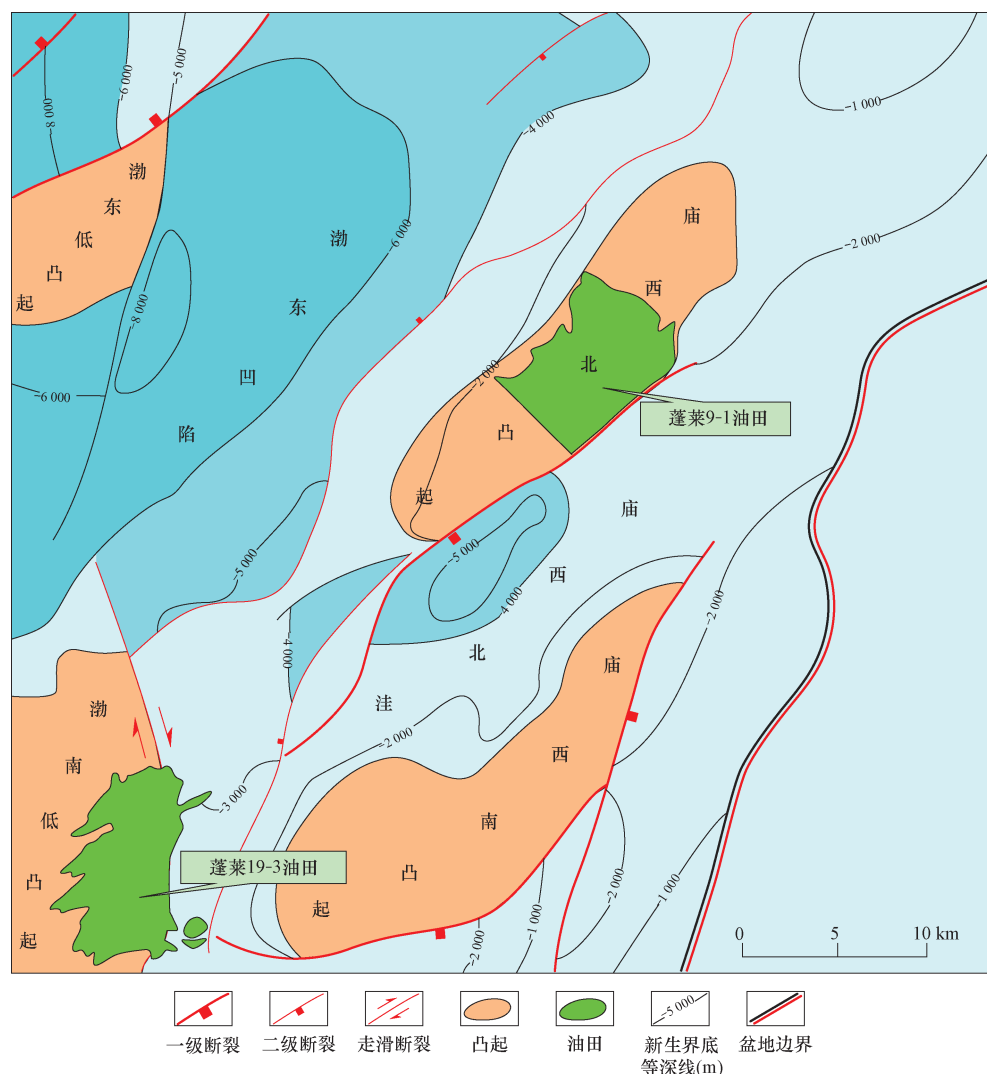


图1 蓬莱9-1 油田位置

Fig. 1 Location of Penglai 9-1 oilfield

19-3 大油田约 35 km,具有良好的成藏背景。

庙西北凸起区古近系整体缺失,新近纪馆陶组的湖相泥岩直接披覆沉积于潜山之上,潜山局部高点甚至缺少馆陶组。潜山储层与馆陶组湖相泥岩在垂向上形成良好的储盖组合。油田内最重要的中生代花岗岩潜山圈闭发育于庙西北凸起南、北两个高点之间的鞍部,含油面积 80.2 km²,储层带发育厚度可达 235 m。结合区域构造演化,通过花岗岩潜山岩性、电性和磷灰石裂变径迹资料分析,认为蓬莱9-1 油田中生代花岗岩潜山曾长期暴露地表,受风化溶蚀作用和郯庐断裂中、新生代走滑作用的共同影响^[6-8],在潜山内部发育优质的花岗岩风化壳储层并呈现明显的分带性。

2 花岗岩潜山风化壳分带特征

2.1 风化壳纵向分带

花岗岩本身属坚硬岩石,但在气候、地形地貌、生物等风化作用影响下形成的花岗岩风化壳,具有明显垂直

分带性^[9-10]。本次通过镜下薄片鉴定、扫描电镜分析、矿物 X-衍射分析并结合岩心与岩屑录井、测井等资料综合研究,将蓬莱9-1 油田花岗岩潜山纵向上由表及里划分为土壤带、砂-砾质风化带、裂缝带和基岩带,其中砂-砾质风化带分异特征明显,清晰可辨,可进一步细分为砂质风化亚带、砾质风化亚带^[11-12](图2)。

土壤带主要由粘土矿物组成,为红土、铁质壳或铝土质壳,颜色常呈红色或绿灰色。

砂质风化亚带主要由砂质粘土或粘土质砂构成,以砂质岩屑为主,偶见残余花岗岩岩块,但含量小于 5%,花岗岩的结构特征基本全部消失。矿物组成以石英和粘土矿物为主,含少量的绿泥石。该层的颜色以黄色、褐黄色为主。

砾质风化亚带主要由花岗岩岩块、风化所形成的岩屑和粘土构成,岩石呈黄褐色、黄色,以岩屑为主,花岗岩砾质岩块次之,花岗岩岩块的含量小于 50%。花岗岩岩块中的母岩结构仍然保留。该带最标志性的特征是具有层状构造,在成像测井中可见该带的暗色层状条带。

裂缝带主要由花岗岩岩块构成,其含量介于 50% ~ 90%,可见 10% ~ 20%的粘土矿物。发育多种角度的裂缝,偶见垂直的节理。裂缝密度随深度的增加总体呈降低趋势,有时也可见裂缝相对密集发育带与裂缝相对不发育的带相间分布的特征。

基岩带主要由新鲜的花岗岩基岩构成,发育少量裂缝,沿裂缝有明显的蚀变。粘土矿物主要分布于裂缝的两侧,含量一般小于 10%。

2.2 风化壳测井响应特征

蓬莱 9-1 潜山风化壳不同构造带的常规测井有明显差异(表 1)。

1) 风化壳由表及里,砂质风化亚带、砾质风化亚带、裂缝带风化程度依次减弱,声波时差值呈现“三级阶梯状”减小。

2) 体积密度值可以反映出岩层的密度大小。花岗岩风化壳从上至下风化程度减弱,体积密度测井值越大,呈现“三级阶梯状”增大。

3) 花岗岩风化壳,无论风化强弱,均呈现“正幅度差”,可含油。花岗岩基岩层具有高的电阻率值,而风

化层的电阻率较低,且风化程度越高,电阻率值越低。同样呈现“三级阶梯状”特征。

4) 在蓬莱 9-1 花岗岩风化壳从上至下风化程度逐渐减弱,补偿中子孔隙度值也减小,同样呈“三级阶梯状”减小。而且,花岗岩风化壳与下部新鲜基岩层的补偿中子孔隙度值有明显差异。

3 花岗岩潜山风化壳储层特征

3.1 风化壳岩性特征

通过蓬莱 9-1 构造潜山岩屑及部分岩心样品分析与镜下鉴定,结合 X-粉晶衍射分析结果,确定构成潜山的主要岩石为中-酸性花岗岩和变质岩,花岗岩岩浆侵位于中-浅变质岩中。花岗岩主要以二长花岗岩和花岗闪长岩为主,含少量钾长花岗岩。

二长花岗岩,主要矿物组成为石英+钾长石+斜长石+黑云母或角闪石。其中钾长石含量占 45% ~ 30%、斜长石占 25% ~ 30%、石英占 20% ~ 25%、黑云母含量小于 10%,且由于风化程度的不同表现出不同的

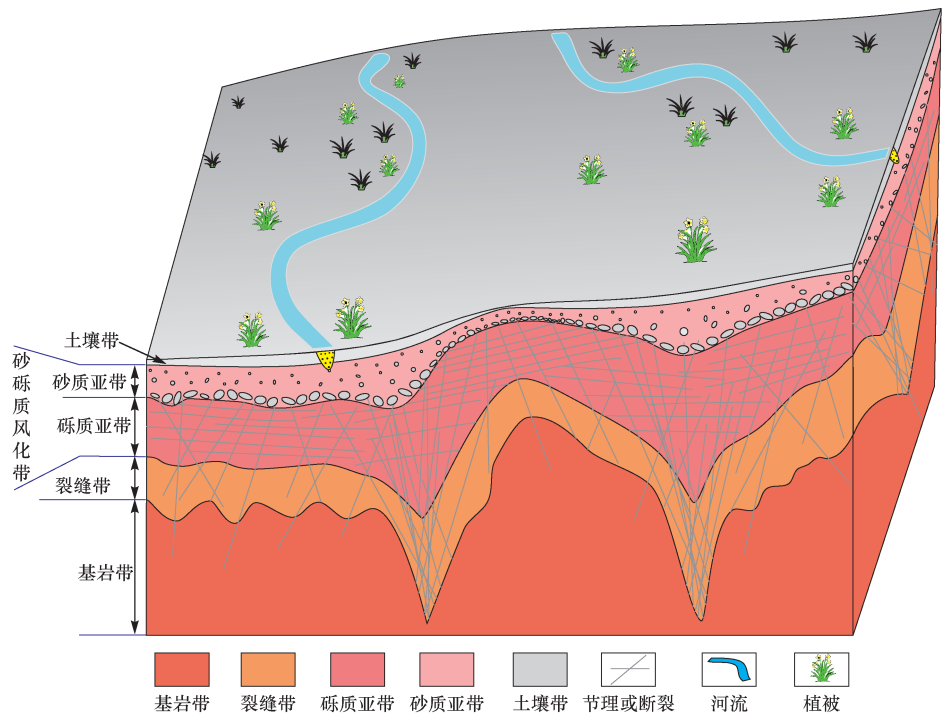


图 2 蓬莱 9-1 构造花岗岩潜山风化壳分带模式

Fig. 2 Zonation model of weathering crust in buried granite hills of Penglai 9-1 structure

表 1 蓬莱 9-1 花岗岩潜山风化壳各风化带常规测井特征

Table 1 Conventional logging characteristics of the weathering crust zones in Penglai 9-1 buried granite hills

风化壳带		声波时差/($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	补偿中子孔隙度/%	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
砂砾质风化带	砂质亚带	75 ~ 120/95	0.25 ~ 0.45/0.33	2.2 ~ 2.5/2.35	5 ~ 15/8.4
	砾质亚带	60 ~ 100/80	0.08 ~ 0.25/0.14	2.3 ~ 2.6/2.45	10 ~ 30/18.5
	裂缝带	50 ~ 80/65	0.01 ~ 0.1/0.04	2.4 ~ 2.6/2.5	30 ~ 220/90.5
基岩带		50 ~ 60	> 0.01	2.6	> 1 000

注:表中数据为最小值~最大值/平均值。

特征。在砂质风化层内长石发生强烈的高岭土化,花岗结构基本消失只保留花岗岩岩屑的形态。原岩中的暗色矿物黑云母已全部或绝大部分转变为绿泥石。砾质风化亚带、裂缝带和基岩带中的二长花岗岩,常呈灰白色,常具花岗结构和二长结构(图3a),块状构造。

花岗闪长岩,主要矿物组成为石英+钾长石+斜长石+角闪石+黑云母;暗色矿物以角闪石和黑云母为主。总体来看,斜长石的含量明显多于钾长石,斜长石占40%~55%,钾长石占10%~15%,石英占20%,暗色矿物占8%~10%,其他占5%。位于土壤层中的花岗闪长岩已全部蚀变成粘土矿物和石英;位于砂质风化带中花岗闪长岩多呈细小的碎屑颗粒存在,绝大部分已全部裂解为石英、长石和粘土矿物,仅在局部残存的碎屑颗粒中能识别出母岩的矿物组成。处于裂缝层和基岩层中的花岗闪长岩,绝大部分保留了花岗闪长岩的结构、构造和矿物组成(图3b,c)。

钾长花岗岩主要由钾长石+斜长石+石英+黑云母+角闪石构成。其中钾长石占长石含量的65%~90%,石英含量在30%左右,暗色矿物的含量为5%。处于粘土带和砂质风化亚带中的钾长花岗岩已基本全部高岭土化,仅在裂缝层和基岩层中的钾长花岗岩较为新鲜,矿物的蚀变相对较弱。位于基岩带中的钾长花岗岩呈肉红色或浅红色,具半自形等粒结构,块状构造(图3d)。

研究区内常见的变质岩包括片岩类,变粒岩(图3e)及动力变质岩(图3f)。区内主要以片岩为主,主要岩石类型为二云母片岩、黑云母片岩及云母石英片岩。岩石具有鳞片变晶结构或者粒状鳞片变晶结构,片状构造。岩石主要由黑云母、白云母、石英、斜长石组成。云母类矿物含量为30%~60%,岩石中云母呈定向排列,部分因强烈定向而形成片理(图3g)。部分石英与斜长石矿物含量总和大于50%,称之为云母石

英片岩(图3h),但石英含量大于斜长石。

花岗岩类潜山岩性与变质岩类岩性具有明显的分带性,岩浆岩分布于潜山的中央部位,由东南至北西方向依次为二长花岗岩、花岗闪长岩、钾长花岗岩,变质岩围绕岩浆岩的四周分布,显示出岩浆岩侵位于变质岩的特征(图4)。

花岗岩类矿物主要由石英和长石组成,长石抗风化能力较弱,遭受风化淋滤易于形成溶蚀孔。同时由于长石和石英的膨胀系数差别在2倍以上,在热胀冷缩过程中容易形成节理,这些节理往往会加速风化溶蚀作用的进行。因此,就岩石类型本身而言,花岗岩类岩石较变质岩易于形成储层。而花岗岩类的几种岩石储层发育程度的差异与岩性本身关系不密切,主要受构造作用和古地貌等因素综合控制,如图4中的二长花岗岩区靠近凸起边界大断层,构造形变强烈,储层厚度最大。

3.2 风化壳储集空间特征

3.2.1 砂质风化亚带储集空间特征

砂质风化亚带原有岩石的结构已完全破坏,岩石已分解成单矿物的长石、石英颗粒和粘土矿物。长石、石英等矿物颗粒间成不规则状相互支撑,颗粒间未被粘土矿物充填处则形成粒间孔隙(图5a,b)。粒间孔特别发育,是砂质风化亚带内主要的储集空间。此外,砂质风化带内的单矿物颗粒中也常见粒内显微裂缝,有的岩屑中局部还可见沿粒内显微裂缝发生溶蚀(图5a—c)。

3.2.2 砾质风化亚带储集空间特征

以花岗岩岩块、砂质碎屑颗粒为主。砾质风化亚带内的砂质碎屑颗粒间和颗粒内常发育类似于砂质风

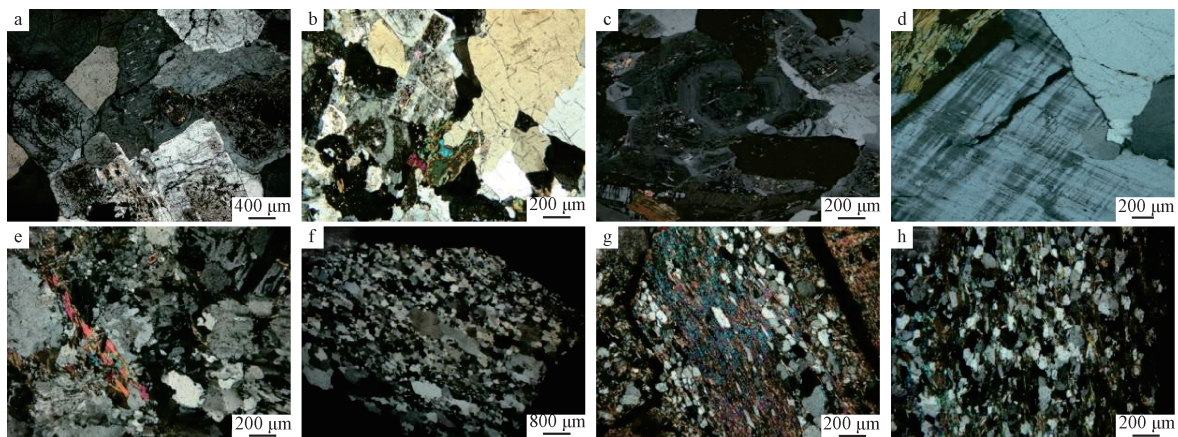


图3 蓬莱9-1花岗岩潜山风化壳及变质岩围岩岩石薄片显微照片

Fig. 3 Thin section micrographs of weathering crust and surrounding metamorphic rocks in Penglai 9-1 buried granite hills

- a. 二长花岗岩,具二长结构,2井,埋深1 436 m;b. 花岗闪长岩,13井,埋深1 502.8 m;c. 花岗闪长岩中长石的环带结构,7井,埋深1 585 m;
d. 钾长花岗岩,11井,埋深1 603.22 m;e. 云母斜长变粒岩,6井,埋深1 353 m;f. 糜棱岩化岩石,3井,埋深1 375~1 380 m;
g. 二云母片岩,6井,埋深1 259 m;h. 云母石英片岩,6井,埋深1 308.5 m

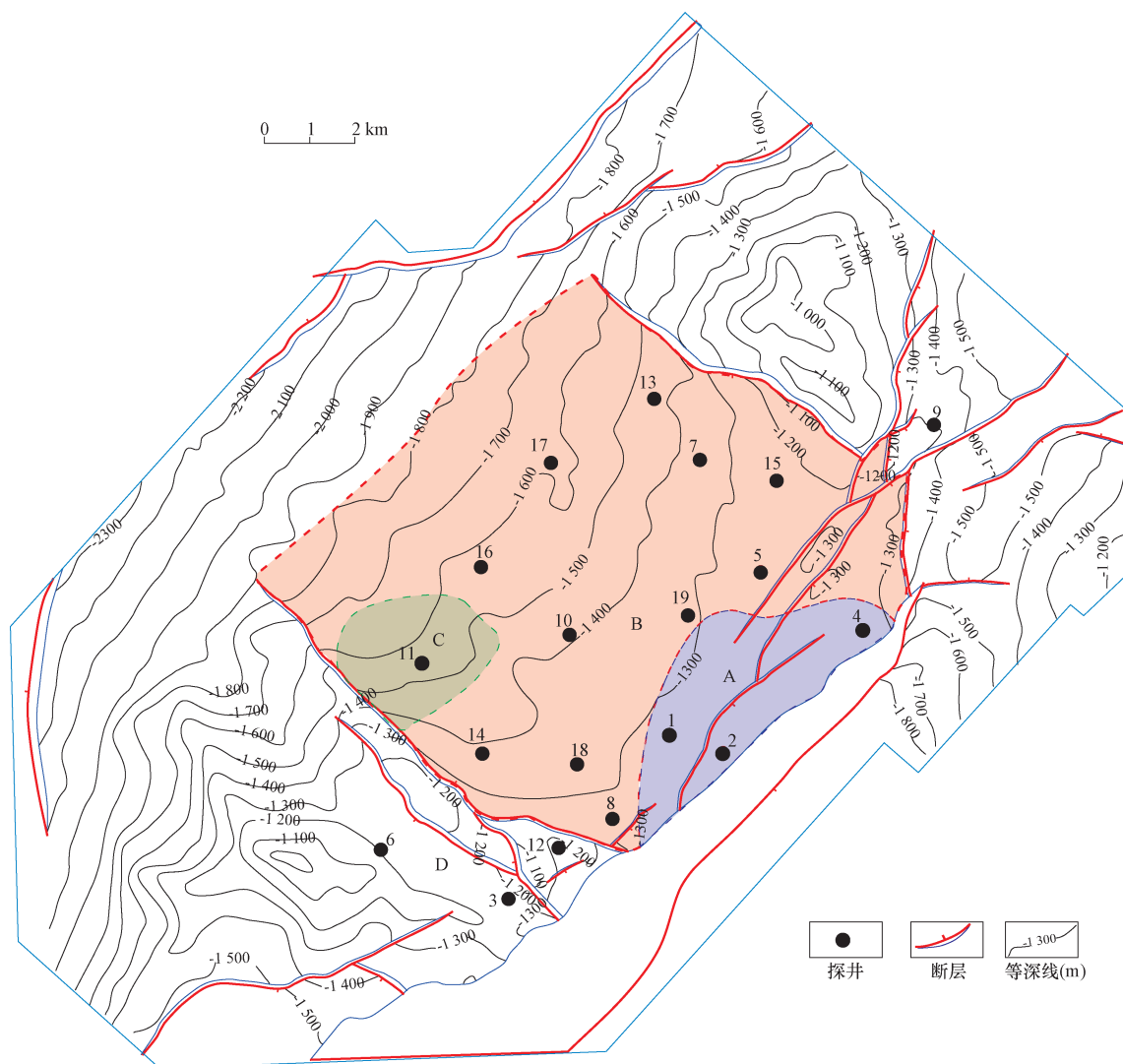


图4 蓬莱9-1花岗岩潜山及变质岩围岩类型

Fig. 4 Rock types of Penglai 9-1 buried granite hills and surrounding metamorphic rocks

A. 二长花岗岩区; B. 花岗闪长岩区; C. 钾长花岗岩区; D. 元古代变质岩区

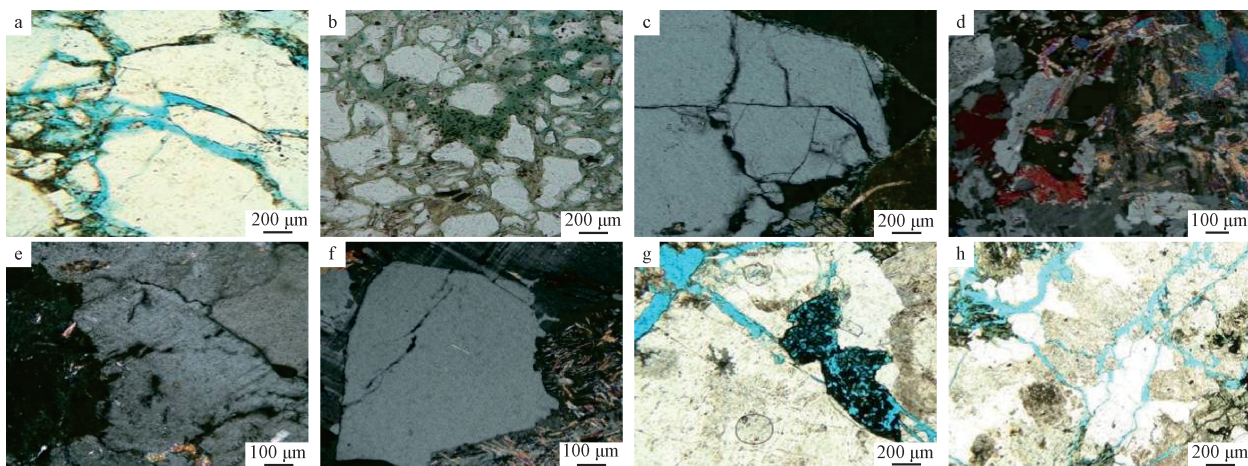


图5 蓬莱9-1花岗岩潜山风化壳储层储集空间显微照片

Fig. 5 Micrographs of reservoir space in weathering crust of Penglai 9-1 buried granite hills

- a. 砂质风化带内石英晶内显微裂缝和粒间孔,铸体薄片,2井,埋深1 285 m; b. 砂质风化带内粒间孔,铸体薄片,7井,埋深1 367.0 m; c. 砂质风化带内斜长石晶内裂缝和沿裂缝的溶蚀扩容(照片的中、下部),2井,埋深1 390~1 395 m; d. 遭强烈蚀变长石中的溶蚀孔,2井,埋深1 325~1 330 m; e. 未蚀变长石中发育晶内溶孔,2井,埋深1 305~1 310 m; f. 长石晶体中发育显微裂缝,2井,埋深1 325~1 330 m; g. 裂缝带发育构造缝及溶孔,1井1,埋深1 605 m; h. 裂缝带网状裂缝并遭受溶蚀,11井,埋深1 605 m

化亚带内。而其中的花岗岩岩块常具有花岗岩的结构特征,在砾质花岗岩块间常发育砾间孔。晶内溶孔出现在花岗岩块内部遭受强烈蚀变的长石内以及未蚀变长石中,呈不规则状(图5d,e),晶内溶孔亦偶见于石英内,呈串珠状分布。砾内的显微裂缝主要见于长石矿物晶体中(图5f)。微裂缝一般形状不规则,长度不等,呈弯曲线状,有时可见被方解石、硅质等物质充填。该带中还普遍发育近于水平的裂缝,或成条带状微裂缝层,其大多为岩体隆升或冷却过程中所形成原生节理缝。

3.2.3 裂缝带储集空间特征

主要储集空间为裂缝和发育于裂缝附近的溶蚀孔隙。裂缝的密度一般为(1~5)条/m。裂缝带也有微裂缝发育,呈线条状。裂缝带内亦可见晶内溶孔、粒间孔、显微裂缝等,但非主要储集空间,且多发育于裂缝破碎带内(图5g,h)。

3.2.4 基岩带储集空间特征

主要为花岗岩新鲜基岩,基本上未受到风化淋滤作用的影响,常见的主要储集空间类型为裂缝,偶见孔隙。

垂向上,受风化作用强度及流体改造程度控制^[13-14],各带储集空间类型总体上有着从孔隙型向裂缝型过渡的渐变趋势。砂质风化带以孔隙型储集类型为主。其下的砾质风化带也以孔隙型储集空间为主要类型,但伴有少量裂缝。再下部的裂缝带,微裂缝占据了储集空间类型的主导地位,孔隙型虽然发育,已退居次要(表2)。

3.3 风化壳储层物性特征

砂质风化亚带厚度最薄,平均厚度仅为5.6 m。岩石孔隙度最大值为27.3%,最小值为5.2%,平均为19.2%,在各井中砂质风化带油气显示良好。

砾质风化亚带平均厚度为18.3 m,同时也是在各风化带中储集空间最为发育的构造带。对该带有限的

表2 蓬莱9-1花岗岩潜山风化带-基岩带中的孔-缝组合类型

风化壳分带	孔隙类型	裂缝类型	主导储集空间
砂质风化亚带	粒间孔、晶内溶孔	晶内显微裂缝	孔隙
砾质风化亚带	粒间孔、砾间孔、晶内溶孔、砾内溶孔	微裂缝、晶内显微裂缝、砾内显微裂缝	孔隙(砾间孔、粒间孔)、(显)微裂缝
裂缝带	粒间孔、晶内溶孔	晶内显微裂缝、微裂缝	(显)微裂缝
基岩带	晶内溶孔	晶内显微裂缝、微裂缝	不太发育的微裂缝

孔隙度数据统计分析可知,孔隙度值最大值为28.7%,最小值为6.1%,其中高于15%的值占36%。某些井段的渗透率尤其高,超过 $56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在其微裂缝发育处甚至高达 $600 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。砾质风化带的油气显示亦较好。

裂缝带厚度最大,平均厚度达到67.4 m。该带孔隙度值较小,各井裂缝带岩石孔隙度最大值为12.8%,最小值仅为3.8%,绝大多数值不超过10%,集中于6%左右。与裂缝带低孔隙度对应的是该带的基质岩心渗透率值也较低,常不到 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。但在局部层段渗透率有特高值,与该带以裂缝为主要储集空间,储层非均质性较强的特点相吻合。裂缝带油气显示也较好,但弱于砂-砾质风化带。

基岩带作为研究区埋藏最深,受风化作用影响最小,环境最稳定的岩石带,其花岗岩侵入体未遭受较大改造^[15-16]。该带孔隙度值绝大多数未能超过10%,最小值仅为3%,故研究区基岩带储层发育较差,同时油气显示也差。

花岗岩风化壳各带储层物性在垂向上有较强的差异性。储层孔隙度总体区间为0~30%,各带孔隙度值越大,说明该带储层物性越好。砂质风化亚带与砾质风化亚带中,分布于20%~30%区间的孔隙度值数量远比下部裂缝带和基岩带多,显示这两个风化壳带的储层物性最好,裂缝带也可视为有利储层,而最底部基岩带储层则发育较差。

4 花岗岩潜山风化壳储层发育控制因素

通过普通薄片及铸体薄片观察、扫描电子显微镜等多种研究手段,确定潜山风化壳储层以次生储集空间为主。花岗岩储集空间的形成机制主要包括花岗岩的表生岩溶作用、有机酸溶蚀作用、构造变形作用、微古地貌作用。花岗岩砂-砾质风化带和裂缝带是有利的储层发育带。

4.1 表生岩溶作用

表生岩溶作用源于大气淡水有微弱的酸性,因为大气中的二氧化碳融入雨水,形成弱碳酸,与岩石中的碳酸钙矿物以及硅酸盐、铝硅酸盐矿物发生溶解、水解、水化作用,生成伊利石、高岭石、绿泥石等粘土矿物,在矿物中产生溶蚀孔隙^[16-17]。

总体来看,垂向上花岗岩潜山由表及里各类矿物的蚀变程度由强到弱。受裂缝发育的控制,靠近底部基岩带产生蚀变现象,靠近裂缝发育处各类矿物可见明显的蚀变特征;远离裂缝处,蚀变程度明显减弱,过渡为正常无蚀变的岩石(图6)。岩石中矿物颗粒的粒

度总体呈现细粒→粗粒→完整的特征。

风化淋滤作用对储层发育起到明显的控制作用,以物理作用、化学作用以及生物作用共同促使研究区出露地表的花岗岩体破裂变得松散,同时也使岩石中矿物发生溶解、氧化、碳酸盐化以及高岭土化等。经过大气淡水的淋滤,将未风化而易于溶解的物质以及风化后形成的粘土质细小物质冲走,从而使致密的花岗岩体发育了新的孔、缝、洞,增加了储集空间,提高了储层孔隙度与渗透性。

风化作用越强烈,矿物蚀变程度越高,孔隙则会越发育,粘土矿物含量会更高,矿物颗粒的粒度则越小。这一过程体现在研究区花岗岩风化壳具有垂直分带性。砂质风化带内风化程度高,各矿物很大程度上均发生蚀变,粘土矿物含量高,且多发育粒间孔、晶内溶蚀孔。砾质风化带次之,粘土矿物含量降低,孔隙发育于蚀变矿物内,以晶内溶孔为主,少见粒间孔,裂缝为次要储集空间。裂缝带内靠近裂缝发育处,矿物蚀变强烈,裂缝为主要储集空间,晶内溶孔次之。风化淋滤作用对基岩带影响较小。

4.2 有机酸溶蚀作用

随着成岩过程中有机质成熟热演化和降解生烃,

可以生成有机酸以及二氧化碳。有机酸和二氧化碳逐渐成为整个风化壳次生孔隙形成的主导因素。

有机酸可以溶蚀碳酸盐矿物及铝硅酸盐矿物,在此过程中形成次生孔隙。以长石溶蚀为例,有机酸在溶蚀长石的过程中可产生一系列的成岩连锁反应,生成各类粘土矿物、方解石以及长石等。深部花岗岩蚀变程度低,基本不受表生岩溶作用的影响,但可见孔隙发育,表明其主要受控于有机酸的溶蚀。由此得知,有机酸对孔隙的控制作用贯穿于各个风化带内。

4.3 构造变形作用

地壳的隆升和郯庐断裂走滑的多次发生对花岗岩风化带的形成有着重要影响,在隆升作用的影响下花岗岩上覆物质被剥蚀,岩体表面露出地表,上覆压力得到释放,致使抬升过程中花岗岩所受应力降低。外围岩石具有膨胀的趋势,引起裂缝沿岩石表面的水平方向发展。

研究区东侧大断裂及南、北两侧的次一级断裂都是郯庐断裂走滑派生的。这些断裂的活动,在花岗岩内形成多组裂缝。这些裂缝一方面起到了连通孔隙的作用;另一方面,大气淡水沿着这些裂缝或节理对花岗岩体的矿物进行交代溶蚀,促进了风化淋滤作用。勘探

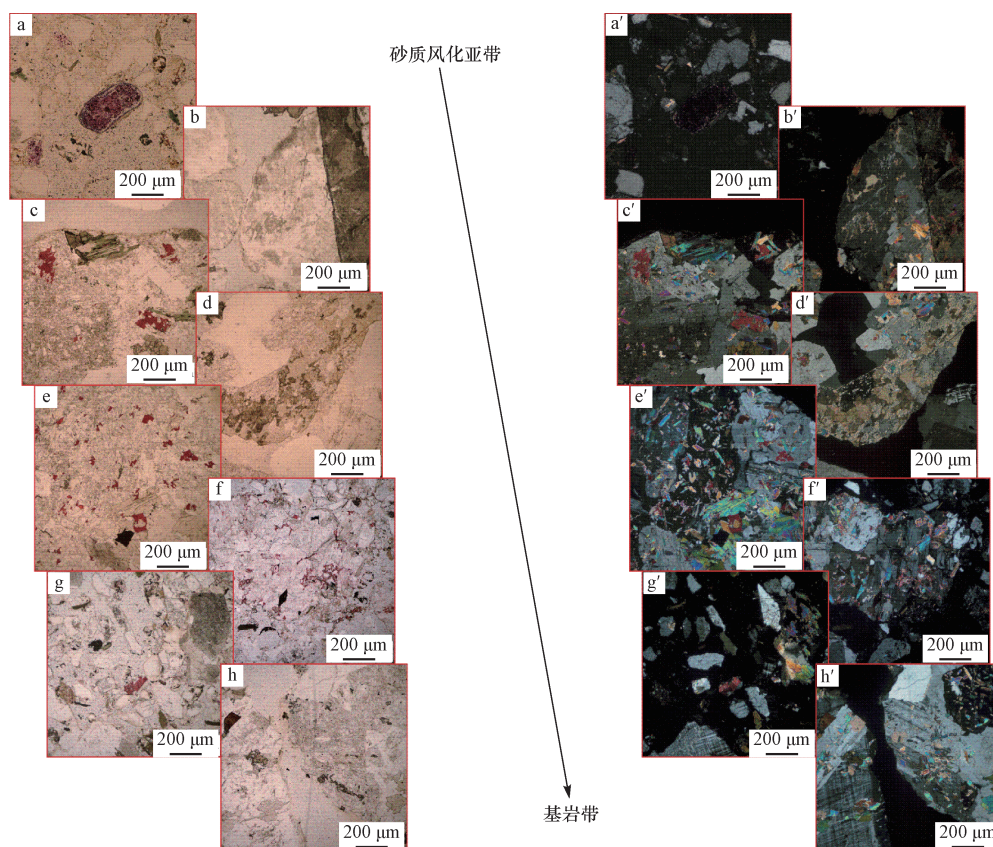


图6 蓬莱9-1花岗岩潜山长石蚀变垂向变化趋势(长石被染色呈红色)

Fig. 6 Vertical change trend of feldspar alteration in Penglai 9-1 buried granite hills (feldspar was dyed to red)

a, a'. 4井,埋深1 308 m; b, b'. 4井,埋深1 320.3 m; c, c'. 4井,埋深1 360.1 m; d, d'. 4井,埋深1 399.6 m; e, e'. 4井,埋深1 424 m; f, f'. 4井,埋深1 430.9 m; g, g'. 4井,埋深1 452.3 m; h, h'. 4井,埋深1 486 m

实践证实,不管是北西向还是北东向断裂,其附近钻井裂缝性储层普遍发育。成像测井中所观测的裂缝走向与断裂走向一致,验证了裂缝的形成主要受周围断裂活动的影响。靠近凸起东侧边界大断裂的二长花岗岩区储层最厚,花岗岩区 75% 的储量规模主要集中在东侧。储层发育程度与断裂的关系表明,断裂的规模越大、活动性越强,储层越为发育。

4.4 微古地貌作用

微古地貌对花岗岩风化壳中土壤带、砂-砾质风化带的平面分布有明显控制作用。在古地貌潜山高点处,砂-砾质风化带储层厚度一般较薄,而潜山地形较低处,砂-砾质风化带储层发育。如图 7,对比潜山上覆馆陶组的地层厚度可以发现,在馆陶组沉积期 10 井的古构造位置相对最高,而东侧 2 井的古构造位置相

对最低,即馆陶组沉积前潜山东侧为地形较低的斜坡区,并非现今的东高西低的构造形态(图 4)。位于古构造高部位的 10 井缺失砂-砾质风化带,而位于斜坡区的 1 井、2 井砂-砾质风化带储层发育,这种储层平面分布特征除了受构造活动影响外,与其所处的古地貌位置密切相关。这主要是由于在古地貌高部位的砂-砾质风化带遭到风化剥蚀,剥蚀碎屑物向山脊两翼的低部位堆积,造成了低部位砂质风化带发育而高部位不发育的特点。不仅如此,主要风化带储层的分界线与潜山地形线有明显平行趋势。这些证据表明,微古地貌对风化壳内各储层起到后期调整、控制的作用。

5 结论

1) 花岗岩潜山风化壳纵向上划分为土壤带、砂质

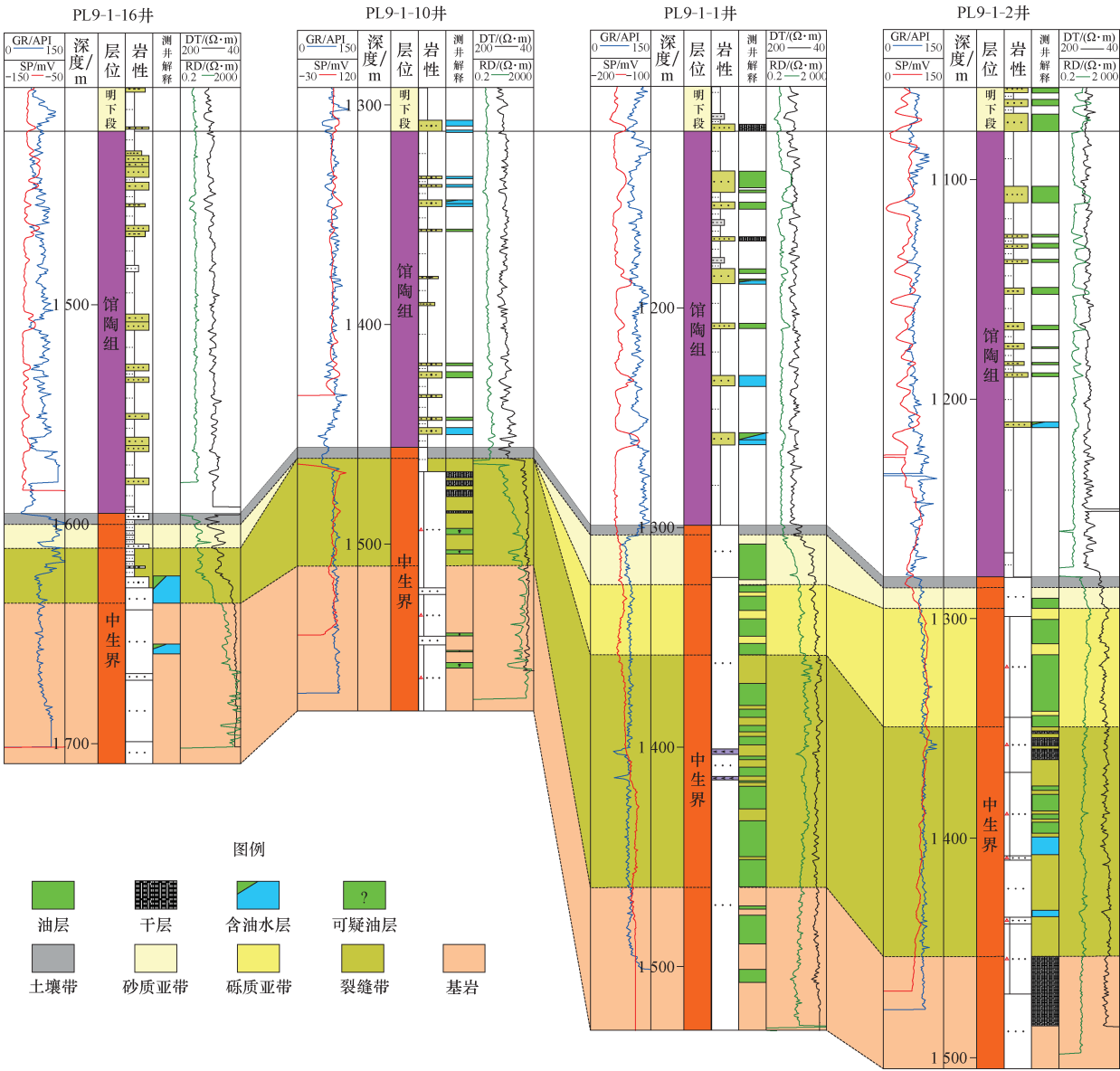


图 7 蓬莱 9-1 花岗岩潜山风化壳分带剖面(井位见图 4)

Fig. 7 Zonation profile of weathering crust in Penglai 9-1 buried granite hills(see Fig. 4 for the well location)

风化带、砾质风化带、裂缝带和基岩带。土壤带薄而发育不全,主力产油储层集中发育于砂质风化带、砾质风化带及裂缝带。

2) 花岗岩潜山主要以二长花岗岩和花岗闪长岩为主,含少量钾长花岗岩,它们侵位于中-浅变质岩中,从而形成潜山中心为酸性岩体,四周为中-浅变质岩围绕的岩浆侵入体。

3) 花岗岩潜山风化壳储层主要发育次生溶蚀孔隙和尺度不等的晶、砾内显裂缝和层间微裂缝,自砂质风化带到砾质风化带再至裂缝带,孔隙发育有逐渐减弱的趋势,裂缝作为主导储集空间具有逐渐增强的趋势。

4) 花岗岩潜山风化壳储层是原有花岗岩潜山受表生岩溶作用、有机酸溶蚀作用、构造变形作用及微古地貌作用综合影响形成的优质储层。表生岩溶作用是花岗岩潜山风化壳次生孔隙形成的主导因素,构造变形作用是花岗岩潜山风化壳裂缝发育的主导因素。微古地貌作用控制砂质风化带、砾质风化带的厚度及分布区域。

参 考 文 献

- [1] Trinh Xuan Cuong, Warren J K. BACH HO FIELD, A fractured granitic basement reservoir, CuuLong basin, offshore Se Vietnam: a "BURIED-HILL" play [J]. Journal of Petroleum Geology, 2009, 32(2): 129-156.
- [2] Li Bingjian. The natural fracture evaluation in the unconventional tight oligocene reservoirs-Case studies from CuuLong basin, southern offshore Vietnam [C] // Society of Petroleum Engineers-SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2011: 955-965.
- [3] Borgohain T. Reservoir fairway analysis of a Barail interval of Deohal area in upper Assam basin using high resolution sequence stratigraphy and seismic attributes [C] // Annual AAPG Convention, 2010: 965-985.
- [4] Haskell J B, Toelsie S, Mohan A. Optimization of sand control for unconsolidated, shallow, and low-pressure sandstone reservoirs: A Suriname case study [C] // Society of Petroleum Engineers-Trinidad and Tobago Energy Resources Conference, 2010: 953-964.
- [5] 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.
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.
- [6] 李欣, 闫伟鹏, 崔周旗, 等. 滨海湾盆地潜山油气藏勘探潜力与方向 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 140-144.
Li Xin, Yan Weipeng, Cui Zhouqi, et al. Prospecting potential and targets of buried hill oil and gas reservoirs in Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 140-144.
- [7] 谯汉生, 方朝亮, 牛嘉玉, 等. 渤海湾盆地深层石油地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [8] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 273-280.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Characteristics and formation mechanisms of the Cenozoic faults in the Bohai Sea waters [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 273-280.
- [9] 黄镇国. 中国南方红色风化壳 [M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
Huang zhenguo. Red residuum in South China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1996.
- [10] 杨洁. 华南沿海花岗岩风化壳岩土工程特征变化研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2004.
Yang Jie. Variation of geotechnical properties of weathered granite in Southeast China [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2004.
- [11] Dewande B, Lachassagne P, Wyns R, et al. A Generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual mode of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering [J]. Journal of Hydrology, 2006, 330: 260-284.
- [12] Ruxton B P, Berry L. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong [J]. Bulletin of The Geological Society of America, 1967, 68: 1283-1292.
- [13] 张斌. 松辽盆地南部张强凹陷义县组火山岩储层特征及成藏规律 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 34(4): 508-516.
Zhang Bin. Characteristics and hydrocarbon accumulation patterns of volcanic rocks in the Yixin Formation Zhangqiang depression, southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 508-516.
- [14] 高山林, 李学万, 宋柏荣. 辽河盆地欧利坨子地区火山岩储集空间特征 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 174-177.
Gao Shanlin, Li Xuewan, Song Bairong. Features of volcanic rock reservoir spaces in oulittuozi region, Liaohe Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 174-177.
- [15] 朱世发, 朱筱敏, 吴冬, 等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中火山物质蚀变及控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 77-86.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wu Dong, et al. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 77-86.
- [16] 谭广辉, 邱华标, 余腾孝, 等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组油藏成藏特征及主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 26-33.
Tan Guanhuai, Qiu Huabiao, Yu Tengxiao, et al. Characteristics and main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Ordovician Yingshan Formation in Yubei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 26-33.
- [17] 窦顺梅, 陈繁荣, 杨永强, 等. 花岗岩地区水-岩反应次生矿物的沉淀饱和指数估算 [J]. 地球化学, 2010, 39(4): 326-336.
Dou Shunmei, Chen Fanrong, Yang Yongqiang, et al. Estimation of saturation index for the precipitation of secondary minerals during water-rock interaction in granite terrains [J]. Geochemical, 2010, 39(4): 326-336.

(编辑 董立)