

基于岩性定量判别的潜山演化模式与储层发育机理

陈国成, 田晓平, 王培春, 王少鹏

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘要: PL 油田为国内第 1 个大型花岗岩潜山油田, 发育孔隙裂缝型储层, 潜山岩性多样, 平面分布规律及其对储层的控制作用复杂, 研究难度大。利用 PL 油田的岩矿和测井资料识别了岩浆岩和变质岩双重潜山结构; 利用岩心岩屑的元素数据和 QAPF 岩性分类法, 判别二长花岗岩和花岗闪长岩 2 种岩性, 结合常规测井资料, 首次建立了基于自然伽马的可细分酸性岩浆岩的判别标准; 在此基础上, 明确了岩性变化规律, 探讨了潜山演化及岩性变化模式, 并对岩性的平面变化对潜山储层发育的影响进行了机理分析。该研究为后期开发寻找优质储层奠定了基础, 以期对同类型潜山油藏储层研究具有指导意义。

关键词: 潜山; 岩性判别; QAPF 岩性分类; 储层

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2015.10005

近年随着勘探程度提高, 渤海海域陆续发现了大中型变质岩、岩浆岩潜山油田。其中 PL 油田为国内第 1 个大型花岗岩潜山油田, 整体为依附于庙西北凸起东界大断层发育的大型半背斜构造。潜山属于长期遭受风化剥蚀的古地貌潜山, 发育南北 2 个高点(图 1), 新近系地层直接超覆或披覆于潜山之上。勘探评价中发现, 仅鞍部含油, 给“高点找油”的传统经验带来困惑。该油田潜山岩性多样, 包含变质岩和岩浆岩等不同岩性, 鞍部花岗岩体顶部发育孔隙裂缝性储层, 内部结构复杂, 非均质性强, 给储层研究带来很大挑战。

目前, 变质岩岩浆岩潜山的岩性识别多借助于薄片鉴定, 元素俘获谱测井(ECS)识别岩性也有一定的应用^[1,2]。前人曾尝试利用常规测井资

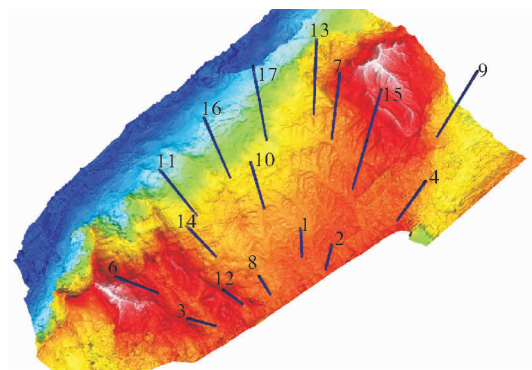


图 1 PL 油田潜山顶面三维可视化图

Fig. 1 3D visualization map of the top of PL buried hill oilfield

料鉴定岩性^[3,4], 但对于性质接近的岩浆岩细分尚无先例, 无法进行岩性定量判别。

本研究利用 PL 油田的岩矿和测井资料, 识别了岩浆岩和变质岩双重潜山结构, 首次建立了基于常规测井资料的可细分酸性岩浆岩的判别标准, 应用于岩浆岩潜山岩性的定量判别, 明确了岩性变化规律及原因, 并在此基础上探讨了潜山演

收稿日期: 2015-04-18

基金项目: 国家科技重大专项“近海大中型油气田形成条件及勘探技术(二期): 近海隐蔽油气藏勘探技术”(2011ZX05023-002)

作者简介: 陈国成(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质方面的研究工作。E-mail: chengch@cnoc.com.cn

化模式以及岩性变化在潜山储层发育中的影响,以期对油田后期开发及同类型潜山油藏的储层研究具有借鉴作用。

1 潜山岩性判别

1.1 双重潜山结构识别

PL 油田潜山共 17 口探井钻遇,对岩屑、壁心、岩心观察和薄片鉴定发现,潜山主要分为 2 大

类岩石:一类是中低级副变质岩,北高点东部斜坡区的 9 井钻遇变质石英砂岩,南部高点和斜坡区的 3、6、12 井钻遇云母石英片岩和石英岩等。结合锆石测年,确定沉积年龄晚于 18 亿 a,为元古界地层;另一类是岩浆岩侵入体,鞍部的 13 口井钻遇,为酸性岩浆岩体和少量基性岩脉,结合锆石测年,确定岩浆体结晶年龄为 165 Ma,为中生界地层^[6]。17 口探井获取了齐全的测井资料和岩矿分析资料,潜山不同类型岩石的矿物组成以及主要测井响应特征见表 1。

表 1 潜山岩石矿物成分和测井响应特征
Table 1 Mineral composition and logging characteristics of buried hill rocks

岩石类型	岩石名称	矿物组成及特征	测井响应
变质岩	变质石英砂岩	变余砂状结构,主要由石英和伊利石等组成	中等密度、较大中子、较大声波时差,较高自然伽马,伽马曲线呈“锯齿状”
	石英岩	粒状变晶结构,块状构造,主要由石英及少量云母组成	中等密度、较低中子、低自然伽马,伽马曲线呈“低—平直”状,密度与中子较“平直”
	云母石英片岩	石英和白云母为主,少量黑云母及绿泥石。石英含量 55%~62%,黏土矿物变质重结晶转化为黑云母、白云母和伊利石等	较高密度、较大中子、较高自然伽马,伽马曲线呈“高一平直”状,密度中子呈较大“负差异”
岩浆岩	花岗闪长岩	半自形粗粒状结构,主要成分:石英 20%~30%;斜长石 50%~60%;钾长石 10%~20%;角闪石+黑云母+绿帘石 8%~15%;磁铁矿 1%~2%。孔缝发育	较低密度、较低中子、中等自然伽马,伽马曲线呈“平直”状,密度和中子呈“小的正差异”或“绞合状”
	二长花岗岩	半自形粗粒状结构,主要成分:石英 20%~35%;斜长石 35%~40%;钾长石 25%~30%;角闪石+黑云母+绿帘石 8%~12%;磁铁矿 1%~2%;白云母 1%~3%。孔缝发育	较低密度、较低中子、较高自然伽马,伽马曲线呈“平直”状,密度和中子曲线呈“小的正差异”或“绞合状”
	基性岩脉	煌斑结构,主要成分角闪石、斜长石和磁铁矿,裂缝多被方解石全充填	低自然伽马、高密度、大中子,伽马曲线呈“平直”状,密度和中子呈“大的负差异”
	辉绿岩	辉绿结构,主要成分为辉石、斜长石和磁铁矿,裂缝多被方解石和绿泥石充填	低自然伽马、高密度、较大中子,伽马曲线呈“平直”状,密度和中子呈“较大负差异”

1.2 中生界岩浆岩岩性定量判别

中生界地层为酸性岩浆岩体,岩石的矿物成分差异主要由硅铝质矿物结晶先后差异造成。硅铝质矿物中包括斜长石和碱性长石,其矿物比例决定了岩石类型,由于其镜下特征相近,仅靠薄片

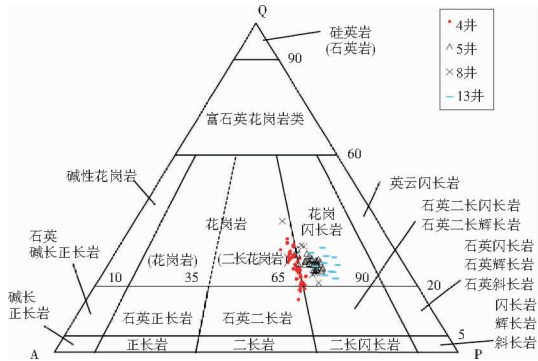
鉴定得出的矿物含量误差较大,难以准确确定岩石类型。

本研究对钻井岩屑岩心进行了系统的元素分析。采用硅酸盐岩石化学分析方法系列标准(GB/T14506-2010)第 14、28 部分规定的方法,对硅、铝、钙、钠、钾等 16 个主次成分量进行测定。

选取 4、5、8、13 井的潜山岩屑岩心样品的元素氧化物折算成 CIPW 标准,该方法可有效消除人为矿物鉴定误差。

岩浆岩定名采用 QAPF 分类法(岩浆岩定量矿物成分分类法),该方法是 IUGS(国际地科联)推荐的一个岩浆岩分类方案。命名以下列矿物体积相对比例进行,用矿物体积含量参数定出基本名称。该方法将岩浆岩岩石所含矿物分为:A(碱性长石)、P(斜长石和方柱石)、F(副长石)、Q(石英)和 M(铁镁矿物及其有关矿物)5 类。由于 Q 和 F 不能共存,任何一种岩石最多只能存在上述 4 组矿物组合。

结合前述计算得到的 CIPW 标准矿物结果和 QAPF 分类法,将岩浆岩岩石进行分类。由于中生界酸性岩浆岩中 M 类矿物含量较少,Q 和 F 不能共存,故只取 QAPF 双三角形的 QAP 三角形图版(图 2),对 4、5、8、13 井潜山岩石进行定量分类。结果表明,4 井为二长花岗岩,少量花岗闪长岩;而 5、8 井以花岗闪长岩为主,13 井均为花岗闪长岩。



注:Q=石英、磷石英、方石英;A=碱性长石,包括正长石、微斜长石、条纹长石、歪长石、透长石和钠长石(An0-5);P=斜长石(An5-100)和方柱石

图 2 中生界潜山 QAP 岩性分类
Fig. 2 QAP lithology classification chart of Mesozoic igneous rocks

不同矿物组分对测井的响应特征不同。长石类矿物,碱性长石其放射性较强,其自然伽马值明显高于斜长石。对于辉石、黑云母、角闪石等暗色矿物,其密度和补偿中子值明显高于石英、长石类浅色矿物^[6](表 2)。

表 2 潜山主要造岩矿物的化学成分及测井特征值(据文献[6]修改)

Table 2 Chemical composition and logging data of main minerals of the buried hill rocks (modified from reference [6])

矿物类别	矿物名称	化学分子式	测井特征值		
			$\rho_b/(g/cm^3)$	$\Phi_{CNL}/\%$	GR/API
浅色矿物	石英	SiO ₂	2.65	-2.0	
	钠长石	Na[AlSi ₃ O ₈]	2.59	-1.3	4~57
	斜长石类	Na _{1-x} Cax[Al _{1+x} Si _{3-x} O ₈] 0.5≤x≤0.7	2.68	-1.4	5~55
	钙长石	Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]	2.74	-1.6	4~53
	正长石	K[AlSi ₃ O ₈]	2.52	-3.0	235~275
	碱性长石类	K[AlSi ₃ O ₈]	2.53	-2.0	240~277
	透长石	(K,Na)[AlSi ₃ O ₈]	2.56	-1.0	175~220
暗色矿物	辉石	(Ca,Na,Mg,Fe ²⁺ ,Mn,Fe ³⁺ ,Al,Ti) ₂ [(Si,Al) ₂ O ₆]	2.96~3.49	3.3	15
	黑云母	K(MgFe) ₃ (AlSiO)(OH) ₂	3.01	21.0	200~350
	角闪石	NaCa ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ [(Si,Al) ₄ O ₁₁] ₂ (OH) ₂	3.20	8.0	28

通过矿物测井响应差异,建立岩性与测井曲线的对应关系。二长花岗岩中碱性长石含量高,因此,在二长花岗岩占优势的井段,自然伽马呈显著高值。4、5、8 和 13 井潜山段的自然伽马频率分布直方图如图 3 所示,通过与这 4 口井所确定的岩石类型(图 2)对比发现,自然伽马

90API 可作为区分岩性标准,高于该值为二长花岗岩,低于该值为花岗闪长岩。对于花岗岩体中的基性岩脉,煌斑岩和辉绿岩具有明显的高中子、高密度的特点(表 1)。通过自然伽马与密度和中子交汇图(图 4),建立自然伽马、密度和中子判别中生界地层岩性的测井定量标准(表

3)。利用该标准对钻遇中生界地层的 13 口井进行了岩性判别(表 4),1、2、4、10 井优势岩性为二长花岗岩,而 5、8、16 井以花岗闪长岩为主,其余各井为花岗闪长岩。

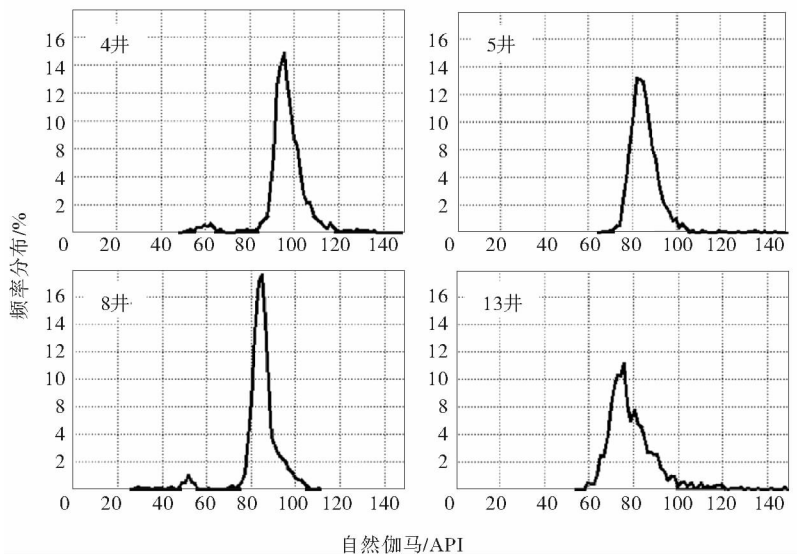


图 3 4、5、8 和 13 井潜山自然伽马分布直方图

Fig. 3 Gamma distribution histogram of Well 4、5、8 and 13 of the buried hill

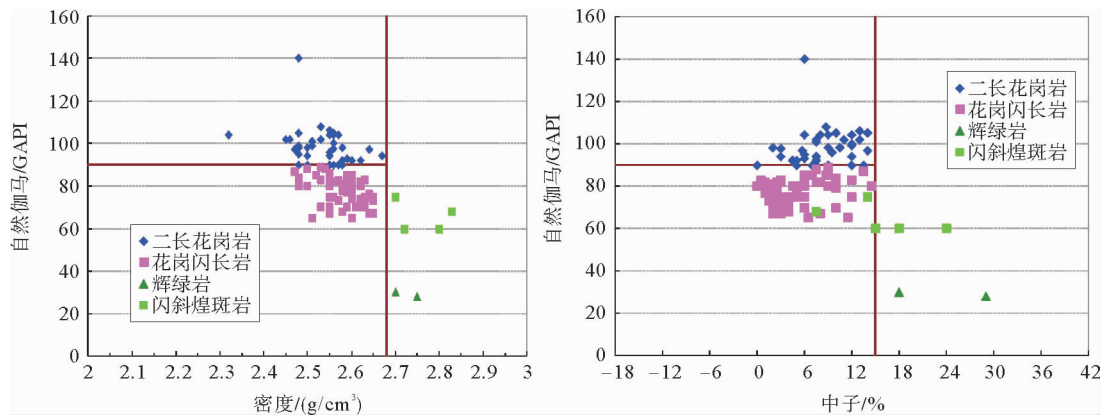


图 4 中生界潜山不同岩性自然伽马与密度和中子交会图

Fig. 4 Gamma vs. density diagram and gamma vs. neutron diagram for different types of Mesozoic igneous rocks

表 3 中生界岩石测井判别标准

Table 3 Quantitative discriminanting logging criteria for Mesozoic igneous rocks

岩石名称	常规测井响应特征		
	自然伽马/API	补偿密度/(g/cm ³)	补偿中子/%
花岗闪长岩	<90	2.43~2.65	<15
二长花岗岩	>90	2.45~2.65	<15
辉绿岩	<60	>2.68	>15
煌斑岩	<60	>2.68	>15

表 4 中生界潜山各井自然伽马值 (API) 和主要岩性

Table 4 Natural gamma and dominant lithology of wells through the Mesozoic

井名	1	2	4	5	7	8	10	11	13	14	15	16	17
自然伽马	85~	86~	85~	73~	63~	77~	83~	58~	62~	53~	74~	75~	66~
	108	110	110	100	85	103	106	90	95	85	96	102	86
中值	97	99	96	84	75	84	93	70	75	68	83	87	76
主要岩性	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	花岗闪长岩为主	花岗岩	花岗闪长岩	二长花岗岩为主	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗闪长岩为主	花岗闪长岩

2 基于岩性的潜山演化模式探讨

综合分析,PL 油田潜山具有明显的双重潜山结构特征,南北高点是元古界地层,为中低级副变质岩,中间宽缓鞍部是中生界地层,为花岗岩体,夹有少量基性岩脉。元古界岩石的变质程度较低,北高点揭示变质石英砂岩,岩性与辽河凹陷新元古界具有可比性,南高点揭示云母石英片岩和石英岩等,与辽河凹陷中元古界具有可比性^[7]。对于元古界变质岩,母岩均为沉积岩,由于母岩中矿物成分差异及变质程度不同,造成变质岩的岩性平面差异。

该区中生代为裂陷盆地发育阶段,岩石圈减薄,软流圈隆升,侏罗纪时期酸性岩浆岩侵入元古界,地层向上隆升。通过花岗岩体内部的锆石测年推测,岩体结晶年龄为中侏罗世。在晚白垩世,该区为挤压抬升构造环境,庙西北凸起区出露地表。由于花岗岩体的侵入,元古界地层呈背斜产状,轴部应力发育,产生张性裂缝,经过长期风化淋滤剥蚀,中部元古界变质岩地层被剥失,花岗岩体出露地表。一直到岩石圈热沉降期的新近纪,新近系地层披覆于庙西北凸起之上,花岗岩体才被覆盖,演化模式见图 5。

岩浆岩侵入体结晶先后存在差异,对于酸性岩浆岩,以硅铝质矿物为主,根据鲍文反应序列可知,斜长石先于碱性长石结晶。因此,该套酸性岩浆岩侵入元古界地层后,受控于侵入通道和地层温度,结晶顺序平面有差异,先结晶的为二长花岗岩,后结晶的为花岗闪长岩,平面具有一定的岩性变化规律。根据各井岩性(表 4),结合该模式,绘制出了花岗岩体的平面优势岩性分布图(图 6)。从 1、2 井高部位向底部位,并向两侧高点,岩性由

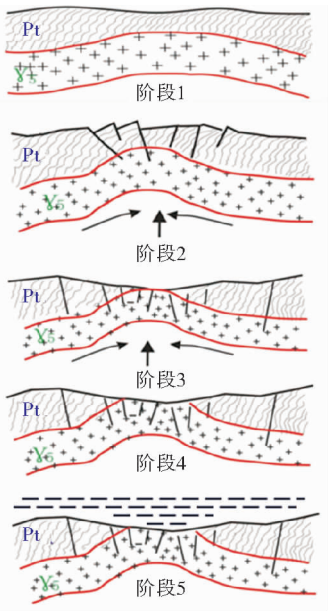


图 5 潜山演化模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the buried hill evolution model

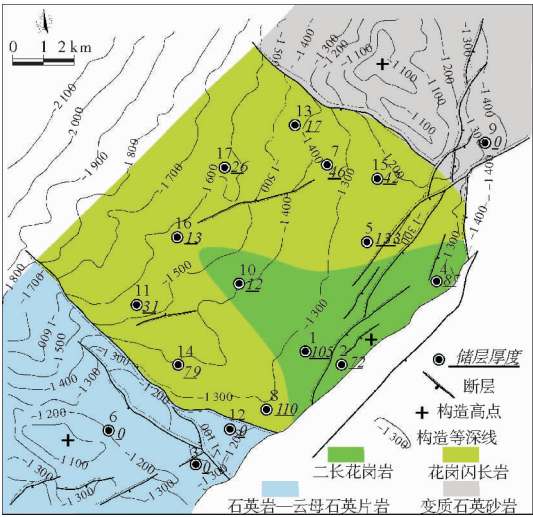


图 6 PL 油田潜山平面优势岩性分布

Fig. 6 Dominant lithology distribution map of buried hill in PL Oilfield

二长花岗岩过渡为花岗闪长岩。推测岩浆侵入通道在边界断层附近,平面主力方向沿着2、1、10、16井方向,并向两侧高点方向延伸。

3 基于岩性潜山储层发育机理分析

PL油田潜山主要为元古界变质岩和中生界花岗岩2大类岩性组成,其所含矿物的性质差异决定了储层是否易发育。石英破裂产生的缝隙溶蚀程度低,易硅化重结晶,通常储集空间不发育;斜长石在应力作用下,因解理发育易破碎形成裂缝;钾长石抗风化、蚀变能力相对斜长石较强,在应力作用下同样易形成裂缝。云母类矿物为塑性矿物,在应力作用下易发生塑性变形,不易产生裂缝。元古界变质岩几类岩石主要矿物为石英、云母类矿物,尽管变质岩区距离断裂近,构造应力发育,但仍难以形成有效裂缝。

由6井10个云母石英片岩岩心样品的物性分析得出,孔隙度仅有 $0.4\% \sim 2.4\%$,渗透率均 $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中生界花岗岩类岩石长石矿物含量大,易形成裂缝,经溶蚀发育成储层。小直径样品分析显示,花岗岩基岩孔隙度为 $0.1\% \sim 27.5\%$,平均 5.2% ,其中 $<5\%$ 的样品占 66% ,局部风化强烈成散砂状的样品孔隙度 $>15\%$ 。渗透率最小值 $<0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大为 $93.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $2.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由于小柱样相对致密,不含较大孔缝,结果比实际情况往往偏低。全直径样品分析渗透率最小为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大为 $1340 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。花岗岩体中的少量煌斑岩脉和辉绿岩脉,受自身矿物组成和改造营力影响,难以成为有效储层。可见,岩性是决定该地区储层是否发育的首要因素。结合测井、岩心和测试资料,该区潜山储层的总孔隙度下限标准为 4% 。按此标准,仅鞍部的花岗岩体内部发育 $12 \sim 133 \text{ m}$ 不等的裂缝孔隙型储层(图6)。

对于中生界花岗岩体内部,钻井揭示的裂缝走向与附近断层具有明显的一致性^[5],说明与其他岩浆岩、变质岩潜山一样,构造应力对裂缝发育程度具有主控作用^[8-11]。从岩性分析,高部位以二长花岗岩为主,抗风化蚀变能力要强于花岗闪长岩,但是1、2、4井储层均比较发育。可见在花岗岩体内部,储层发育程度主要受控于构造应力

的强弱,二长花岗岩和花岗闪长岩间的岩性差异为次要因素。10井周边储层不发育,主要因为附近断裂不发育,构造应力弱,且岩性相对抗风化能力偏强。综合来看,在花岗岩体内,储层发育程度受不同岩性中钾长石和斜长石含量变化的影响相对较小。

4 结论

(1)PL油田潜山为中生界变质岩和中生界岩浆岩双重潜山结构,鉴于不同岩性组成矿物及其测井响应特征不同,建立了定性和定量判别标准,可依靠自然伽马有效判别二长花岗岩和花岗闪长岩。

(2)中生界酸性岩浆岩体侵入元古界变质岩地层,后经抬升剥蚀出露并风化淋滤形成储层。受控于侵入通道和岩浆结晶冷凝差异,造成花岗岩体内部岩性变化。

(3)通过实钻资料和潜山储层发育机理分析,该区岩性决定了中生界花岗岩体为主要储层发育区域。花岗岩体内部构造应力对储层发育具有主控作用,岩性差异影响较小。

参考文献:

- [1] 郭春杰,刘春艳,黄铁坤. 古潜山地层岩性分析与储层评价[J]. 国外测井技术, 2009,170(2):17-21.
- [2] 韩琳,张建民,邢艳娟,等. 元素俘获谱测井(ECS)结合QAPF法识别火成岩岩性[J]. 测井技术, 2010,34(1):47-50.
- [3] 孙娜,辽河盆地兴马太古界潜山的岩性识别与储层划分[J]. 石油地质与工程, 2007,21(4):20-26.
- [4] 黄凯,宋洪亮,陈建波,等. JZS油田潜山岩性识别及油层判别[J]. 测井技术, 2014,38(3):321-347.
- [5] 陈国成,王清斌,官大勇. 蓬莱9-1油田中生界储层特征研究报告(内部资料)[R]. 天津:中海石油(中国)有限公司, 2012.
- [6] 张福功. 辽河坳陷西部凹陷兴马潜山储层研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2008:24.
- [7] 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.
- [8] 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与发育控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2005,32(6):17-20.
- [9] 张攀,胡明,何冰,等. 东营凹陷太古界基岩储层主控因素分析[J]. 断块油气田, 2011,18(1):18-21.

[10] Luo J L, Morad S, Liang Z G, Zhu Y S. 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.

[11] 李 军, 薛培华, 张爱卿, 等. 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其控制因素[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 329-335.

BURIED HILL EVOLUTION MODEL AND RESERVOIR FORMING MECHANISM BASED ON QUANTIRATIVE LITHOLOGICAL STUDIES

CHEN Guocheng, TIAN Xiaoping, WANG Peichun, WANG Shaopeng
(CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300452, China)

Abstract: The PL oilfield is the first large granitic buried hill oilfield discovered in China. It is characterized by lithological diversity and porous fractured reservoirs. Study of the lithology of the reservoir, therefore, remains critical, even it is quite difficult. Upon the mineralogy and well logging data, a double structure of buried hill consisting of Proterozoic metamorphic rocks and Mesozoic igneous rocks respectively has been recognized. As for the igneous rocks, according to the element composition of the rocks and following the QAPF lithology classification, granodiorite and monzogranite are identified. In combination with well logging data, quantitative discriminant criteria for buried hill igneous rocks are established for the first time. On this basis, the lithology variation is carefully studied, which found the basis for the construction of the buried hill evolution model. In addition, the variation in buried hill lithology and the influence of lithology on the development of buried hill reservoirs are thoroughly discussed. The study results is believed useful in the further research and development of buried hill reservoirs.

Key words: buried hill; lithology discrimination; QAPF lithology classification; reservoir