

Reservoir Identification and Distribution Characteristics of Penglai 9-1 Geoburried-Hills

Bairong Song¹, Fengrong Wang², Xiangkuan Gong³

¹Exploration and Development Research Institute, Liaohe Co. Ltd., PetroChina, Panjin Liaoning

²Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corporation, Tianjin

³Northwest University, Xi'an Shaanxi

Email: songbr@petrochina.com.cn

Received: Jun. 11th, 2015; accepted: Jun. 23rd, 2015; published: Jun. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Through rock slice identification and chemical analysis of rock, the Penglai 9-1 oilfield and Geoburried-hills have been considered as two sets of lithology. One set is middle-low grade metamorphic surrounding rocks, such as metamorphic quartz sandstone, quartzite, Mica-Quartz schist in Meso-Neo Proterozoic, the other is granite intrusive. LA-ICP-MS zircon U-Pb Dating indicates that the $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons from 162 - 169 Ma, weighted average 165 Ma, thus the age probably represents the formation age of the granite, indicating that the rock in the Middle Jurassic intruded into the Neoproterozoic strata. The identification method of rock in Geoburried-hills has been established by studying the physical features of rock, based on the analysis of the rock and mine identification and time analysis. We have analyzed the reasons and controlling factors of Genesis of reservoir and pointed out the best exploration area which has laid the foundation for the oil gas storage declaration and so on.

Keywords

Penglai 9-1, Lithology, Jurassic, Log Curve, Reservoir Characteristic

蓬莱9-1潜山储层岩性识别及油气富集特征

宋柏荣¹, 王凤荣², 宫相宽³

¹中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦

²中海油天津分公司, 天津

³西北大学, 陕西 西安

Email: songbr@petrochina.com.cn

收稿日期: 2015年6月11日; 录用日期: 2015年6月23日; 发布日期: 2015年6月29日

摘要

通过岩石薄片鉴定和岩石化学分析等手段, 识别出蓬莱9-1油田潜山钻遇两套岩石组合。一是中新元古界中低级变质岩围岩, 包括变质石英砂岩、石英岩、云母石英片岩等; 二是花岗岩侵入体。花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 所测锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中于162~169 Ma, 其加权平均年龄为165 Ma, 该年代代表了花岗岩的形成时代, 即该岩体于中侏罗世侵入到中新元古界地层。在岩矿鉴定和年代分析的基础上, 通过各类岩性岩石物理特征研究, 建立了该潜山带岩石的测井识别方法。分析了储层成因及控制因素, 并提出了有利油气富集区带, 为油气储量申报等奠定了基础。

关键词

蓬莱9-1, 岩性, 侏罗世, 测井曲线, 储层特征

1. 引言

蓬莱 9-1 油田前新生界潜山勘探获得重大突破, 钻遇两套岩石组合, 一套是中低变质岩, 另一套是花岗岩侵入体。通过对该区 13 口钻井资料的分析, 认为该区潜山为中新元古代潜山, 通过锆石 U-Pb 测年技术, 认为花岗岩体形成于中侏罗世。钻探资料显示, 潜山岩性与油气富集关系密切, 中新元古界中低级变质岩储层差, 无油气显示; 花岗岩体中见到较好油气显示, 部分井试油获得工业油气流, 是潜山主要储集岩。中新元古界潜山岩性与侵入体的产状关系需要通过钻井岩性鉴定、岩性测井识别和地震等多种手段结合确定。这就需要在岩性鉴定的基础上, 结合不同岩类由于矿物组成、元素组成以及结构构造等差异所反映的不同的岩石物理特征, 建立岩性的测井识别方法, 研究潜山岩性的分布。油气富集与储层发育程度有关, 在岩性识别的基础上, 研究各类岩性的储集空间特征、储层控制因素等, 进而研究油气富集规律, 是进行潜山油气勘探及该类潜山储量申报的基础。

2. 地质概况

蓬莱 9-1 油田位于渤海中东部海域, 东经 120°20'~121°40', 北纬 38°35'~38°45' 范围内。油气田范围内平均水深 28.0~33.0 m。蓬莱 9-1 构造位于庙西北凸起之上, 其在北东方向与胶辽隆起倾没端相接, 东南方向为庙西北洼, 西部为渤东凹陷(图 1)。

渤海湾盆地前古生界基底形成之后, 先后经历了加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅运动等多期构造及改造作用[1]。早古生代早期的加里东运动结束了稳定的克拉通发展阶段, 开始了晚奥陶世-早石炭世长达 140 Ma 的构造抬升、风化剥蚀。三叠纪末华北地区处于南北挤压应力场之中, 庙西北凸起初步形成。中生代晚三叠世至早、中侏罗世内陆盆地发展阶段, 华北板块受扬子板块碰撞构造效应影响结束, 继而受古太平洋板块俯冲、碰撞作用影响, 华北东部地壳增厚, 局部地区在一定深度和温度条件下壳幔重熔形成岩浆, 就近沿张性断裂呈整合型“岩盖”式侵入到元古界变质岩地层之中, 即庙西北凸起鞍部

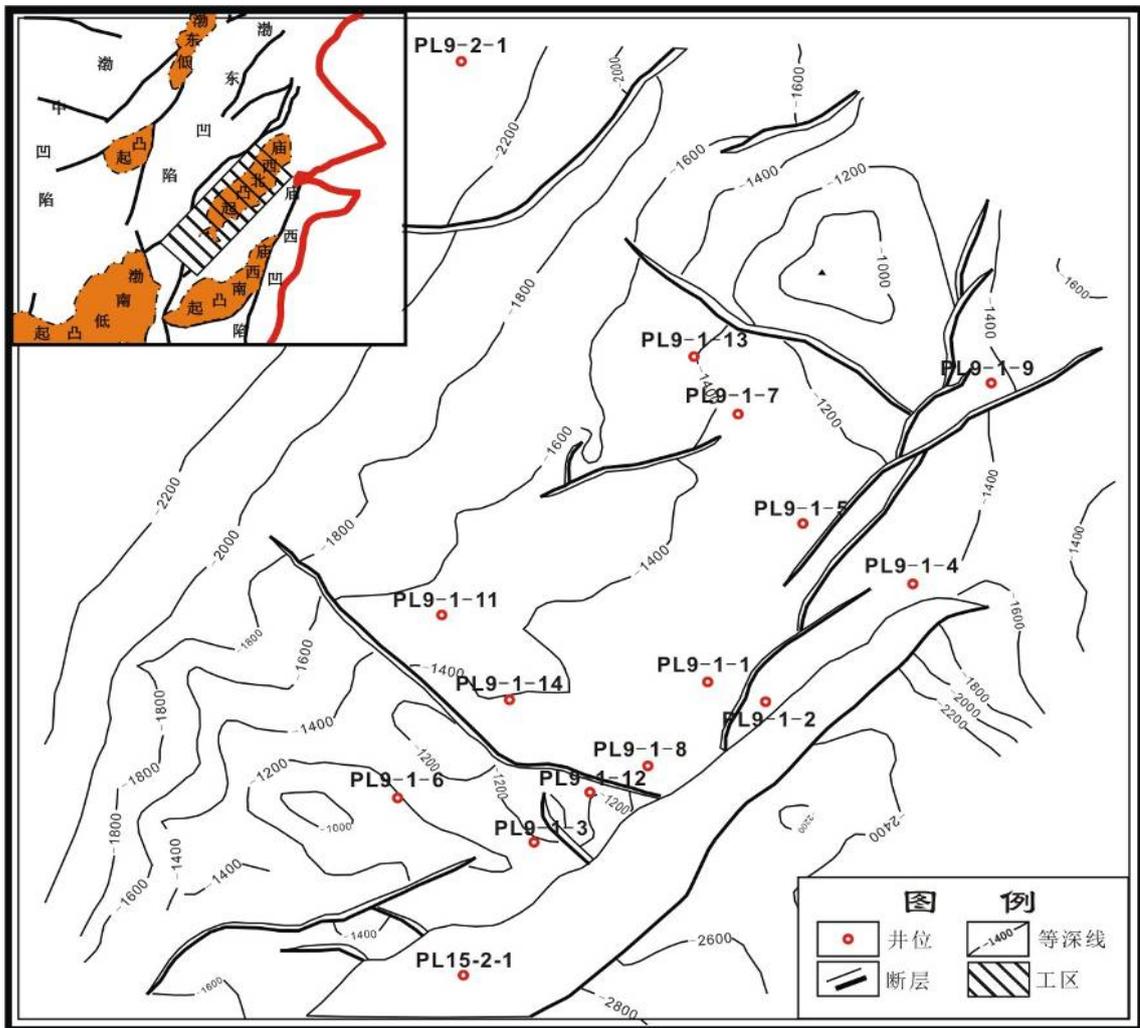


Figure 1. The exploration array map for Penglai 9-1 structure

图 1. 蓬莱 9-1 构造潜山勘探部署图

的花岗岩侵入。中生代晚侏罗至白垩纪裂陷盆地发育阶段，进入受太平洋构造域控制新时期，同时诱发 NNE 向郯庐断裂发生大规模的左旋走滑[2]-[4]，进入岩石圈减薄的峰期[5]，同时出现地幔柱活动，伴随着软流圈的隆升。在上述两种机制的联合作用下，中国东部进入大规模的裂陷或断陷盆地发育阶段，沉积了较厚的 J_3-K_1 地层，并伴有强烈的火山活动。晚白垩世，整体处于挤压抬升构造环境，庙西北凸起区出露地表，由于花岗岩体的侵入，在侵入体的上部产生张性裂缝，加上岩性不同而形成差异风化剥蚀，花岗岩体出露地表。古近纪强烈的断陷作用，渤海地区形成了一系列的箕状半地堑，构成了复杂的多重“盆-岭”构造。庙西北凸起一直处于风化剥蚀之中，其中鞍部花岗岩体风化良好的储层。新近纪进入岩石圈热沉降期，新近系地层披覆于庙西北凸起之上。

3. 潜山岩石类型及形成时代

3.1. 主要岩石类型

3.1.1. 岩相学鉴定

蓬莱 9-1 构造潜山钻井取心和旋转井壁取心分析，认为潜山岩性主要为一套中新元古代中低级副变

质岩和中生代酸性岩浆侵入体，主要岩石类型及特征见表 1 及图 2。另外，在潜山带顶部和局部构造强烈部位，分布着原岩风化淋滤和构造破碎等形成的角砾岩和砂砾岩。

截止到 2012 年蓬莱 9-1 构造潜山共钻井 13 口。其中 4 口井(PL9-1-3、PL9-1-6、PL9-1-9、PL9-1-12)揭示的岩性为元古宙中低级副变质岩，其余 9 口井均钻遇大套酸性侵入体。并且 9 口井受到强烈的风化剥蚀，其中 PL9-1-4、PL9-1-5、PL9-1-7、PL9-1-8、PL9-1-13、PL9-1-14 井元古宙云母石英片岩和石英岩再沉积形成了残积层；其余 PL9-1-1、PL9-1-2、PL9-1-6 井新近系地层直接覆盖在侵入体之上。从钻井油

Table 1. Main rock types in Penglai 9-1buried-hills

表 1. 蓬莱 9-1 潜山带主要岩石类型

大类	主要类型	矿物组成及特征
中低级副变质岩	① 变质石英砂岩	变余砂状结构，主要由石英和伊利石等组成
	② 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。
	③ 云母石英片岩	鳞片粒状变晶结构，片状构造，主要由石英和云母等组成，并且云母等暗色矿物含量大于 30%。
岩浆侵入体	① 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%。
	② 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%。

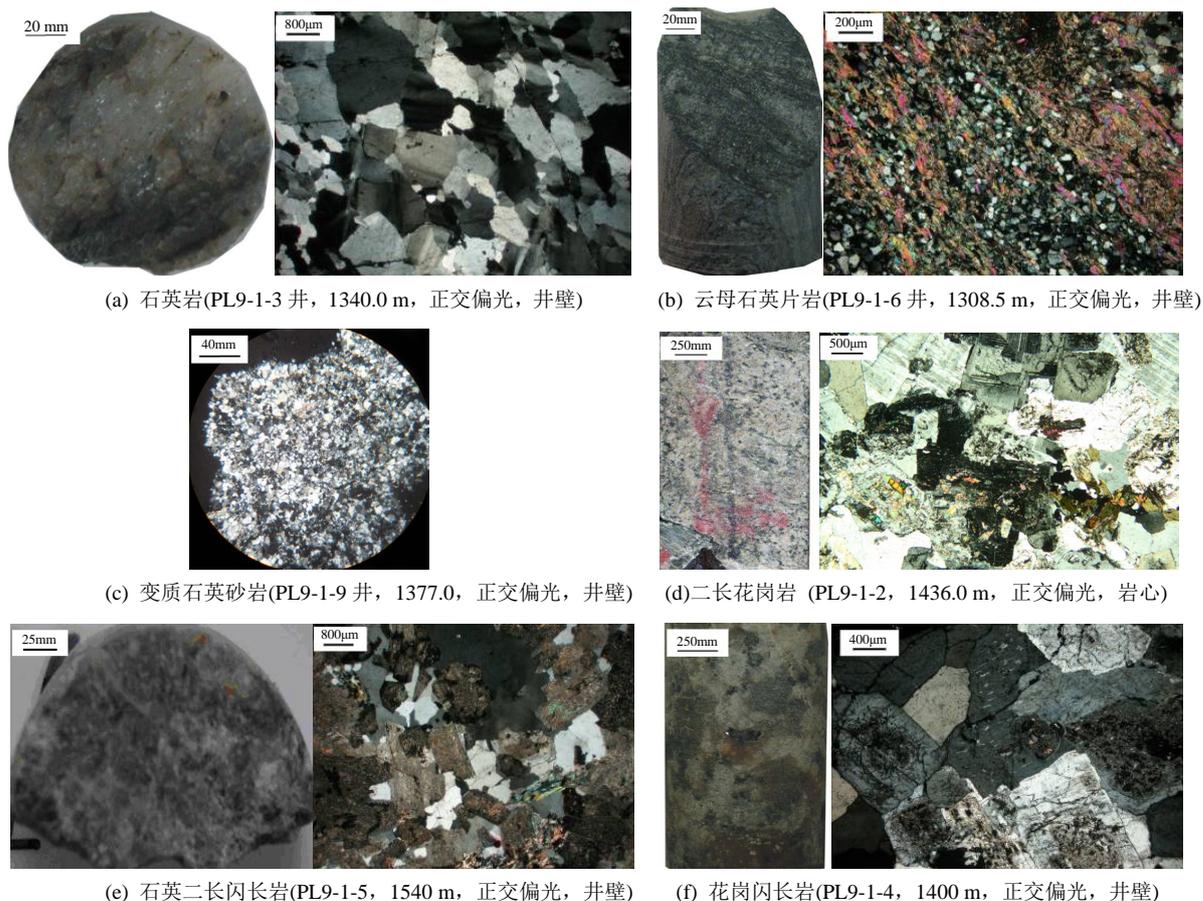


Figure 2. The major rocks types of the geoburried-hills

图 2. 潜山岩石类型

气显示看, 元古宇围岩差, 花岗岩体显示好, 是潜山的主要储层。由于岩浆的结晶分析作用, 广义的花岗岩体在不同井段和不同井在矿物组成和含量上存在差异性, 反映在测井曲线上表现为自然伽玛、岩石密度、补偿中子的差异性。主要岩石类型为花岗闪长岩、二长花岗岩和石英二长闪长岩(图 4D、E、F)。三类岩石以灰白色、浅粉色为主, 均具有半自形粒状结构, 在矿物成分上表现为石英、斜长石和钾长石相对含量的差别[6] [7]。

3.1.2. 岩石化学分析

为了进一步划分花岗岩体的岩石类型, 寻找花岗岩体在测井曲线自然伽玛上的差异性以及岩相学鉴定目估矿物含量的误差引起岩石定名偏差, 研究人员还对测井曲线上伽玛值存在差异的井(选取 PL9-1-4、PL9-1-5 井)系统选取花岗岩体钻遇的岩屑, 进行氧化物分析(表 2)。PL9-1-5 井氧化物折算成 CIPW 标准矿物, 在侵入岩的 QAP 分类三角图(图 3)中, 投点主要落在花岗闪长岩区域, 少部分落在石英二长闪长岩区域; PL9-1-4 井氧化物折算成 CIPW 标准矿物, 在侵入岩的 QAP 分类三角图(图 3)中, 投点主要落在二长花岗岩区域, 少量落在石英二长岩区。从 QAPF 分类双三角图还可以看出, 投点主要沿着花岗闪长岩与二长花岗岩中间线分布, 反映了岩浆分异结晶矿物含量稍有差别等特点。岩相学定名与岩石化学分析定名吻合, 岩石类型的差异性, 在测井曲线上有很好的反映, 尤其是自然伽玛的差异, 为岩性的测井识别关系的建立奠定了岩矿基础。

3.2. 潜山岩石形成时代

蓬莱 9-1 含油气构造带自上而下钻遇的地层依次为: 第四系平原组, 新近系明化镇组(上段、下段)、

Table 2. The major elements compositions of some samples of intrusion PL9-1 (10^{-2})
表 2. PL9-1 侵入体部分样品氧化物分析结果(10^{-2})

井号	井深	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	总量
PL9-1-5	1325~1330	花岗闪长岩	69.33	0.214	14.86	2.6	1.45	0.062	0.476	2.38	3.89	3.42	0.063	98.7
PL9-1-5	1375~1380	花岗闪长岩	68.57	0.199	15.04	3.52	2.00	0.088	0.69	2.58	4.07	3.50	0.067	100.3
PL9-1-5	1395~1400	花岗闪长岩	67.38	0.224	16.06	2.99	1.55	0.074	0.721	2.73	4.16	3.4	0.071	99.4
PL9-1-5	1480~1485	花岗闪长岩	66.57	0.175	17.22	2.54	1.40	0.072	0.497	2.96	4.88	3.53	0.078	99.9
PL9-1-5	1535~1540	石英二长闪长岩	64.10	0.207	17.27	3.05	1.95	0.073	0.557	3.58	4.82	3.34	0.092	99.0
PL9-1-5	1540~1550	石英二长闪长岩	63.71	0.194	17.93	3.02	1.45	0.072	0.515	3.65	4.86	3.44	0.095	98.9
PL9-1-5	1550~1555	石英二长闪长岩	62.47	0.219	17.84	2.82	1.50	0.077	0.608	4.31	4.90	3.30	0.101	98.1
PL9-1-5	1555~1560	石英二长闪长岩	63.50	0.215	17.85	3.07	1.50	0.073	0.574	3.70	4.87	3.37	0.102	98.8
PL9-1-4	1365~1370	二长花岗岩	71.89	0.107	14.03	2.7	2.00	0.058	0.368	1.32	4.08	4.05	0.041	100.6
PL9-1-4	1375~1380	二长花岗岩	70.18	0.132	13.51	4.11	3.40	0.078	0.551	1.69	3.83	4.12	0.047	101.6
PL9-1-4	1390~1395	二长花岗岩	70.80	0.119	14.63	2.03	1.40	0.061	0.557	1.88	3.89	4.27	0.053	99.7
PL9-1-4	1460~1465	二长花岗岩	69.69	0.138	15.26	2.38	1.70	0.063	0.507	2.14	4.18	4.12	0.054	100.2
PL9-1-4	1495~1500	二长花岗岩	67.94	0.097	16.31	1.95	1.20	0.063	0.392	2.02	4.73	4.67	0.048	99.4
PL9-1-4	1510~1515	二长花岗岩	68.65	0.116	15.21	3.2	2.45	0.066	0.476	2.1	4.28	4.19	0.05	100.8

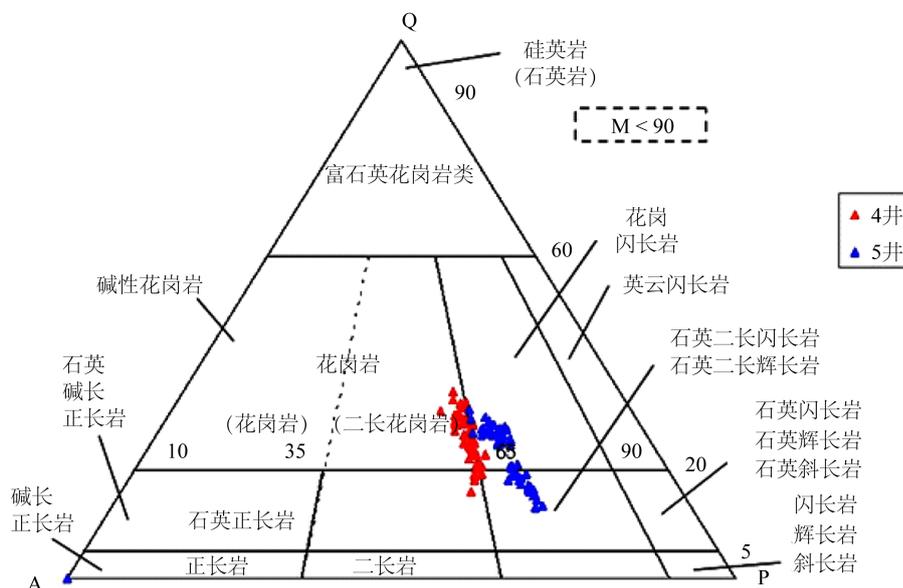


Figure 3. The QAP triangle classification diagram of the granite (after IUGS, 2002)
图 3. 侵入岩的 QAP 分类三角图(引自 IUGS, 2002)

新近系馆陶组 and 元古宇(未穿)。上覆盖层和基底潜山岩性分界明显，潜山上部新生代盖层为砂泥岩沉积，潜山岩性为中低级变质岩(变质石英砂岩、云母片岩等)和花岗岩。在电性上，两套地层具有明显的差别，下部地层由于岩石成岩强，达到中低级变质，以及大套岩浆侵入岩，在电性上表现为具有三高一低的特点，即具有较高的岩石密度、补偿中子、自然伽玛和较低的声波时差。

对围岩和侵入体岩心分别进行了单颗粒锆石年代分析。选取了云母石英片岩围岩(PL9-1-3 井 1435.0 m)和二长花岗岩侵入体(PL9-1-4, 1405 m)分别 5 Kg 左右，送到了河北地质局廊坊实验室进行了锆石分离，随后将分离好的锆石在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行锆石年代分析。首先是在双目镜下挑出具有代表性的锆石颗粒，镶嵌在环氧树脂中并抛光至锆石颗粒的一半，然后进行锆石的光学、阴极发光(CL)显微图像及 LA-ICP-MS 分析。其中，投射光、反射光照相在该实验室 Nikon 显微镜下完成；CL 图像分析在该实验室的 Gatan 阴极发光 MonoCL3+ 及 Quanta 400 FEG 热场发射环境扫描电子显微镜下完成；锆石微区 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室最新引进的 Hewlett packard 公司最新一代带有 Shield Torch 的 Agilent 7500a ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200 M 光学系统的联机上完成。激光束斑直径为 30 μm, 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm, 详细分析步骤和数据处理方法参见文献[8]。云母石英片岩获得了三个年龄集中段(表 3、图 4)，2685 Ma、2423 Ma 和 1793 Ma(由于变质程度低没有获得变质年龄)，说明该套岩石的沉积年龄应晚于 1793 Ma，即晚于古元古代。花岗岩体锆石年代分析(表 4、图 5)，19 个点的年龄结果集中，并都在协和线上，花岗岩的侵位年龄为 164.6Ma, 形成于中侏罗世。与吴福元等[9]，研究的中国东部花岗质岩浆作用的划分的第二各阶段(180~156 Ma)吻合。该时期东亚多板块拼贴运动学发生重大调整，构造体制发生重大转换，形成了以内陆俯冲和内陆造山为特征东亚汇聚构造体系等[5]。

4. 岩性的测井识别

变质岩和岩浆岩岩石类型的测井识别曾做过研究[10]，并初步建立了岩浆岩和高级变质岩大类的测井识别方法。测井曲线识别岩性的原理主要是依据每种岩性的矿物组合及元素组成的不同，反映到常规测

Table 3. LA-ICP-MS U-Pb analytical results of the mica quartz
表 3. 云母石英片岩樣品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析結果

樣號	同位素比值						年齡(Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年齡	1 σ	年齡	1 σ	年齡	1 σ
PL9-1-3-01	0.11108	0.00119	5.28724	0.06683	0.34528	0.00434	1817	20	1867	11	1912	21
PL9-1-3-02	0.15944	0.0018	10.44474	0.13701	0.47512	0.00608	2450	20	2475	12	2506	27
PL9-1-3-03	0.15896	0.00195	10.37593	0.14345	0.47344	0.00604	2445	21	2469	13	2499	26
PL9-1-3-04	0.11001	0.00123	5.091	0.06609	0.33567	0.0042	1800	21	1835	11	1866	20
PL9-1-3-05	0.11114	0.00135	5.37376	0.07475	0.35038	0.00486	1818	23	1881	12	1936	23
PL9-1-3-06	0.10918	0.00129	5.1043	0.06844	0.33911	0.00428	1786	22	1837	11	1882	21
PL9-1-3-07	0.15757	0.00241	10.28351	0.16646	0.47359	0.00608	2430	27	2461	15	2499	27
PL9-1-3-08	0.15626	0.0018	10.17408	0.13416	0.47237	0.00598	2416	20	2451	12	2494	26
PL9-1-3-09	0.15819	0.0025	10.26739	0.17037	0.47108	0.00628	2436	27	2459	15	2488	28
PL9-1-3-10	0.1585	0.0042	10.61411	0.27534	0.48593	0.0085	2440	46	2490	24	2553	37
PL9-1-3-11	0.11708	0.00161	5.29921	0.0799	0.32833	0.0043	1912	25	1869	13	1830	21
PL9-1-3-12	0.15537	0.00316	10.26257	0.214	0.47937	0.00673	2406	35	2459	19	2525	29
PL9-1-3-13	0.10761	0.00172	5.02864	0.08521	0.33925	0.00455	1759	30	1824	14	1883	22
PL9-1-3-14	0.10834	0.00172	4.99373	0.08397	0.33476	0.00445	1772	30	1818	14	1861	21
PL9-1-3-15	0.1631	0.00285	10.6185	0.18774	0.47253	0.00657	2488	30	2490	16	2495	29
PL9-1-3-16	0.10742	0.00137	4.7945	0.0666	0.324	0.00404	1756	24	1784	12	1809	20
PL9-1-3-17	0.1089	0.00138	5.01901	0.06893	0.33457	0.00414	1781	24	1823	12	1860	20
PL9-1-3-18	0.1553	0.00216	10.64016	0.1567	0.49738	0.00653	2405	24	2492	14	2603	28
PL9-1-3-19	0.15011	0.00216	9.62052	0.14551	0.4653	0.00592	2347	25	2399	14	2463	26
PL9-1-3-20	0.16014	0.00247	10.69118	0.16958	0.48462	0.00627	2457	27	2497	15	2547	27
PL9-1-3-21	0.15834	0.00239	10.71409	0.1673	0.49111	0.00643	2438	26	2499	15	2575	28
PL9-1-3-22	0.10778	0.00196	5.17108	0.09432	0.3483	0.00464	1762	34	1848	16	1926	22
PL9-1-3-23	0.11368	0.00143	5.0991	0.06886	0.32549	0.00404	1859	23	1836	11	1816	20
PL9-1-3-24	0.10477	0.00201	4.9887	0.09479	0.34559	0.00466	1710	36	1817	16	1914	22
PL9-1-3-25	0.15647	0.00306	10.67855	0.20625	0.49527	0.00703	2418	34	2496	18	2593	30
PL9-1-3-26	0.18876	0.00454	14.83054	0.34403	0.56991	0.00863	2731	41	2804	22	2907	35
PL9-1-3-27	0.18023	0.00352	14.00801	0.2693	0.56402	0.00787	2655	33	2750	18	2883	32

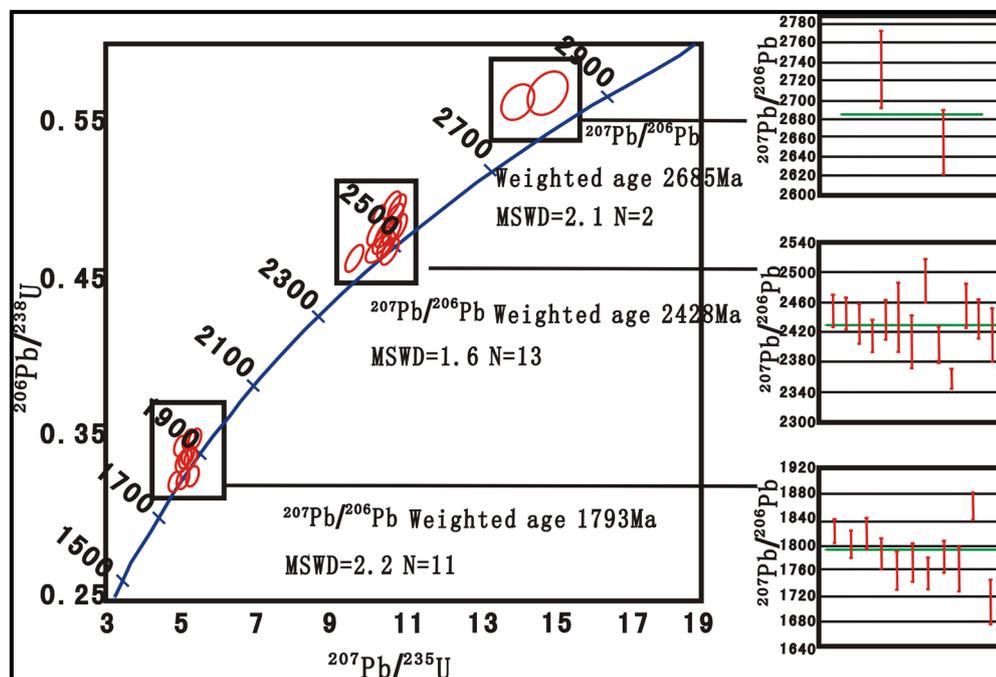


Figure 4. U-Pb concordia diagram of zircons in the mica quartz

图 4. 云母石英片岩锆石 U-Pb 谐和图

Table 4. LA-ICP-MS U-Pb analytical results of adamellite

表 4. 二长花岗岩样品同位素分析结果

样号	同位素比值						年龄(Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
PL9-1-4-01	0.04791	0.00537	0.16583	0.01814	0.02511	0.00073	95	236	156	16	160	5
PL9-1-4-02	0.04886	0.00110	0.17855	0.00406	0.02658	0.00040	141	54	167	3	169	3
PL9-1-4-03	0.04857	0.00244	0.18182	0.00891	0.02726	0.00050	127	114	170	8	173	3
PL9-1-4-04	0.04984	0.00161	0.17350	0.00552	0.02531	0.00039	188	77	162	5	161	2
PL9-1-4-05	0.04966	0.00147	0.17342	0.00510	0.02539	0.00038	179	71	162	4	162	2
PL9-1-4-06	0.04750	0.00118	0.16647	0.00415	0.02551	0.00036	74	57	156	4	162	2
PL9-1-4-07	0.04849	0.00108	0.17708	0.00401	0.02655	0.00036	123	54	166	3	169	2
PL9-1-4-08	0.05086	0.00116	0.17471	0.00405	0.02502	0.00036	234	54	163	4	159	2
PL9-1-4-09	0.04986	0.00328	0.17746	0.01147	0.02581	0.00047	188	150	166	10	164	3
PL9-1-4-10	0.04954	0.00628	0.17919	0.02187	0.02625	0.00100	173	269	167	19	167	6
PL9-1-4-11	0.04858	0.00287	0.17271	0.00995	0.02579	0.00049	128	134	162	9	164	3
PL9-1-4-12	0.04815	0.00143	0.17679	0.00527	0.02663	0.00042	107	69	165	5	169	3
PL9-1-4-13	0.05090	0.00158	0.17814	0.00542	0.02538	0.00037	236	73	166	5	162	2
PL9-1-4-14	0.04783	0.00134	0.17437	0.00480	0.02644	0.00037	91	65	163	4	168	2
PL9-1-4-15	0.05003	0.00074	0.17703	0.00290	0.02566	0.00035	196	35	166	3	163	2
PL9-1-4-16	0.04895	0.00148	0.18896	0.00573	0.02799	0.00047	145	72	176	5	178	3
PL9-1-4-17	0.04951	0.00119	0.17592	0.00431	0.02575	0.00042	172	57	165	4	164	3
PL9-1-4-18	0.05017	0.00125	0.17840	0.00446	0.02579	0.00036	203	59	167	4	164	2
PL9-1-4-19	0.04849	0.00102	0.17181	0.00369	0.02570	0.00035	123	51	161	3	164	2

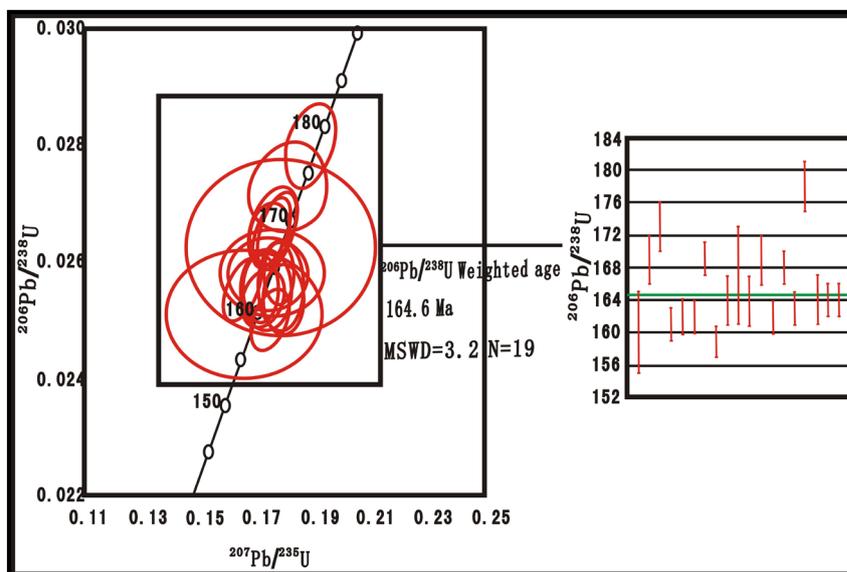


Figure 5. U-Pb concordia diagram of zircons in monzogranite

图 5. 二长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

井上尤其是自然伽玛、岩石密度和补偿中子等数值及形态特殊的差异性，建立起岩性与测井曲线的对应关系，进而达到测井曲线识别岩性的目的。无论是变质岩还是岩浆侵入体等结晶基岩，主要造岩矿物可分为硅铝矿物和铁镁矿物两个系列。硅铝矿物矿物中 SiO_2 与 Al_2O_3 的含量高，不含 FeO 和 MgO ，包括石英、钾长石和斜长石等，它们基本不含色素原子，颜色较浅，又称浅色矿物；铁镁矿物矿物中 FeO 、 MgO 含量较高，包括橄榄石、辉石、角闪石、黑云母等，这些矿物的颜色一般较深，又称暗色矿物。岩浆侵入体随着岩石类型由基性向酸性过度，主要造岩矿物发生明显变化，铁镁矿物含量降低，硅铝矿物含量增加，反映在测井曲线上自然伽玛值增大，原因是根据鲍文反应序列[7]，Th、U、K 等放射性元素主要进入岩浆晚期结晶的矿物，如钾长石、黑云母等，对于早期结晶的矿物斜长石、辉石、角闪石等自然伽玛值低。利用测井曲线识别岩性，需要搞清楚测井参数所反应的岩石物理特征，每一种矿物有特征测井相应值。通过矿物的测井相应特征，来研究每一种岩石的测井曲线特征，建立岩性与测井曲线的对应关系，从而实现利用测井曲线恢复巨厚的基岩岩性剖面，最终有效划分储集层和非储集层。

以往的研究成果只做到了利用测井曲线识别岩浆岩基性、中性和酸性大类，但还没有达到对具体岩石类型的细分，变质岩主要是识别高级变质岩。本次研究除了建立了花岗岩侵入体具体岩石类型与测井曲线的对应关系，同时还建立了不同围岩的测井响应特征(表 5)。通过对花岗岩岩体不同类型的岩石的测井识别，以及在单井中与围岩接触关系，以此来研究岩浆演化特点以及与地震结合确定花岗岩侵入体的侵入方向、分布面积等，为储量计算提供依据。

潜山中酸性侵入体，包括二长花岗岩、花岗闪长岩、石英二长闪长岩；元古宇围岩变质石英砂岩、石英岩和云母石英片岩等的岩石密度和补偿中子交汇特征及自然伽玛曲线特征见图 6。

二长花岗岩，自然伽玛曲线平直状，值在 90 API~110 API；岩石密度和补偿中子交汇曲线一般补偿中子曲线在右，岩石密度曲线在左，“小的正差异”或“绞合状”，岩石密度 $2.45 \text{ g/cm}^3 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ ，补偿中子小于 6%。

花岗闪长岩，自然伽玛曲线平直状，值在 75 API~90 API；岩石密度和补偿中子交汇曲线一般补偿中子曲线在右，岩石密度曲线在左，“小的正差异”或“绞合状”，岩石密度 $2.45 \text{ g/cm}^3 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ ，补偿中子小于 6%。

Table 5. The logging identification standard of oilfield PL9-1
表 5. PL9-1 油田岩性测井识别标准

岩石学大类	岩石测井分类	常规测井响应特征		
		自然伽玛 (API)	补偿密度 (g/cm ³)	补偿中子 (%)
岩浆侵入体	二长花岗岩	>90	2.45~2.65	<6
	花岗闪长岩	75~90	2.43~2.65	<6
	石英二长闪长岩	60~75	>2.68	6~12
低中级副变质岩	变质石英砂岩	<100	<2.40	>18
	石英岩	<60	>2.58	<10
	云母石英片岩	>70	>2.40	>12

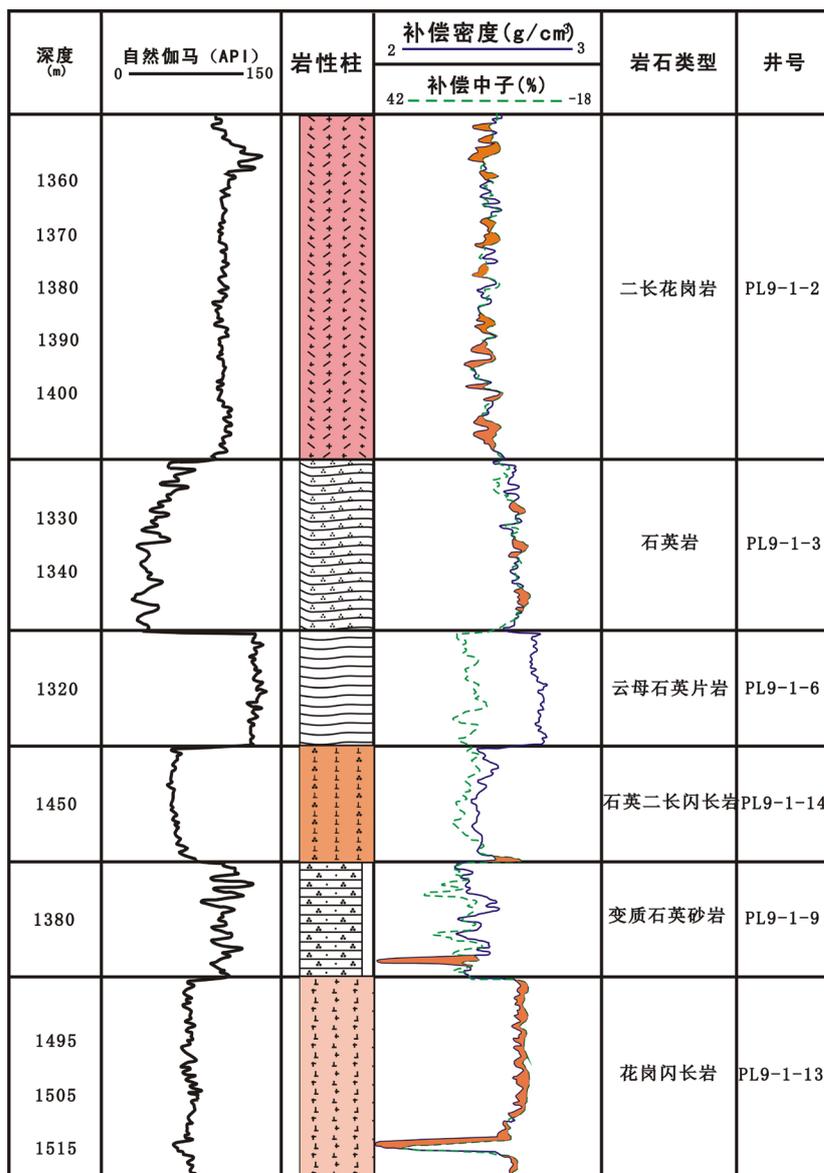


Figure 6. Logging response characteristics of major rock types

图 6. 主要岩石类型测井响应特征

石英二长闪长岩，自然伽玛曲线平直状，值在 60 API~75 API；岩石密度和补偿中子交汇曲线呈“绞合状”，岩石密度大于 2.65 g/cm^3 ，补偿中子小于 6%~12%。

变质石英砂岩，测井曲线上表现为：中等密度、较大中子、较大声波时差，较高自然伽玛等特征，自然伽玛曲线呈“锯齿状”，岩石密度和补偿中子交汇曲线一般补偿中子曲线在左，岩石密度曲线在右，“小的负差异”或“绞合状”。

石英岩，测井曲线上表现为：中等密度、较低中子、低自然伽玛等特征，自然伽玛曲线呈“低-平直”状，岩石密度与补偿中子较平直的“绞合状”。

云母石英片岩，测井曲线上表现为：较高密度、较大中子、较高自然伽玛等特征，自然伽玛曲线呈“高-平直”状，岩石密度和补偿中子呈较大的“负差异”。

5. 储集空间类型及物性特征

本区潜山岩性主要为一套中新元古代中低级副变质岩和中生代岩浆侵入体，4 口井钻遇中新元古代围岩(云母石英片岩、变质石英砂岩和石英岩)，无油气显示；11 口井钻遇中生代花岗岩体，钻井取心和井壁取心具有较好的油气显示，因此，花岗岩体是本区的主要储集岩。

5.1. 储集空间类型

岩心观察、铸体薄片图像分析、以及毛细管压力曲线等资料均表明花岗岩体储集空间具有双重介质的特点，储集空间分为孔隙型和裂隙型两大类，主要的储集空间类型：构造裂缝、构造-溶解缝、收缩缝、破碎粒间孔及溶孔(图 7)。研究发现储集空间组合类型以裂缝-孔隙型为主，次为裂缝型。

5.2. 物性特征

8 口井，106 块样品物性分析结果表明，花岗岩体储层孔隙度最大值 25.4%，最小值 0.39%，平均值为 5.49%。孔隙度 1% 以下占 12.3%，1%~5% 占 51.9%，5%~10% 占 20.8%，10% 以上的占 15.1%；渗透率最大值为 $93.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，最小值为 $0.007 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其中，大于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占 4.9%， $(10\sim50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占 7.3%， $(1\sim10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占 4.9%，占 4.9%， $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下的占 82.9%。根据孔隙度、渗透率划分标准[11]，孔隙度以 III 类为主，次为 I、II 类，渗透率以 IV 类为主。孔隙度、渗透率具有良好的相关性。

6. 储层成因机理及油气富集区带

6.1. 储层成因机理

花岗岩体在漫长的地质历史时期，经历了岩体结晶收缩、风化剥蚀、溶蚀淋滤、构造破碎等改造，储集空间较发育。尤其是潜山在新生代新近系馆陶组时期才被覆盖，长期风化淋滤，物理和化学成因的储集空间发育，岩溶作用相当强烈。李振宏[12]等研究裸露期风化壳岩溶模式，从上到下大致可分五个带：残积带、垂直淋滤带、水平渗流溶蚀带、溶蚀沉积共生带和滞留带，该种模式虽然是在研究碳酸盐岩储层时建立起来的，但同样适用于火成岩储层。火成岩岩体易形成收缩缝，在构造应力作用下，易形成构造裂缝，经历较长时期的风化淋滤，形成的风化淋滤带厚度仅次于碳酸盐岩，但远大于砂质岩。王艳忠[13]等人对不整合面上下岩性特征进行了研究，认为不整合应包括不整合面上下岩石三部分，不整合面之上的叫残积带，主要为底砾岩和水进砂体；不整合面之下的叫风化粘土层和半风化岩石，风化粘土层位于风化壳最上部，主要是细粒残积物，是识别不整合面的重要标志，在上覆沉积物压实下岩性较致密，具有良好的封盖能力；半风化岩石，在不整合形成过程中，褶皱及断裂作用可形成大量构造裂缝[14]，上覆地层的剥蚀产生大量的卸荷裂缝，大气淡水沿早期形成的裂缝下渗，是下覆岩层发生岩溶形成大量的

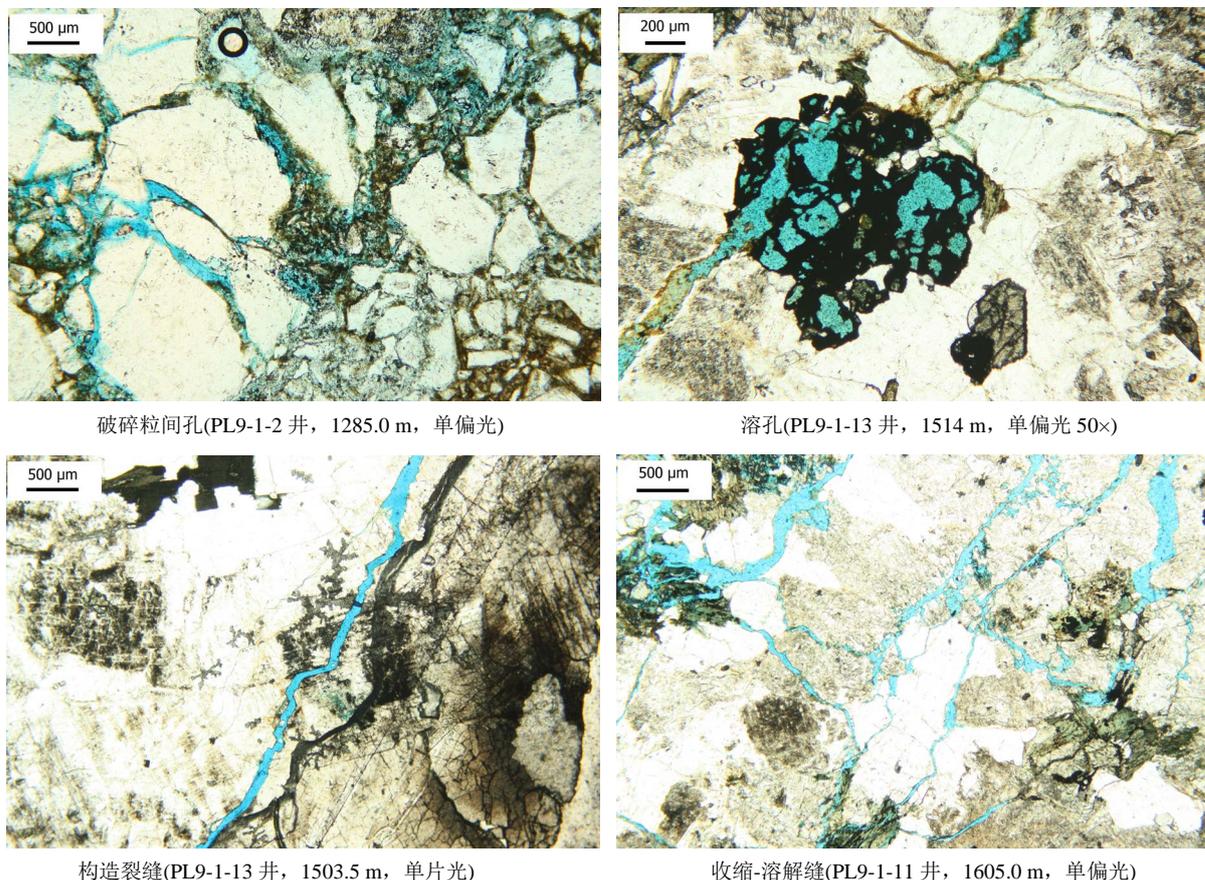


Figure 7. The reservoir space types in the granite
图 7. 花岗岩体储集空间特征

风化裂缝和溶蚀孔洞[15], 因此, 储层主要分布在半风化岩石中, 所以这类储层从高部位向低部位半风化岩层厚度逐渐变薄。

6.2. 有利油气富集区带

根据试油资料结合测井、钻井取心、旋转井壁取心、气测录井资料分析论证, 本区花岗岩侵入体潜山油藏整体含油, 油层主要分布在潜山半风化岩石中, 受构造、风化程度等因素的控制, 在潜山上部、靠近大断裂等构造高部位, 由于风化程度较强, 油层较发育, 如 PL1-1-1 井、PL1-1-2 井、PL1-1-5 井等井有效厚度都在百米以上; 而对于潜山下部、远离大断裂等构造低部位来说, 由于风化程度较弱, 甚至没有风化, 油层不发育, 有效厚度较薄, 如 PL1-1-13 井, 该井处于构造较低位置, 花岗岩侵入体几乎没有风化, 仅在潜山中上部, 由于受到构造及垂直淋滤等作用的影响, 发育部分裂缝型油层。油层从构造高部位向低部位半风化岩层厚度逐渐变薄。花岗岩体潜山油藏以风化壳型为主, 次位构造内幕型, 因此, 构造高部位或靠近大断裂为有利勘探区域。

7. 结论

- 1) 蓬莱 9-1 潜山主要岩性为中低级变质岩和花岗岩侵入体。中低级变质岩包括变质石英岩、变质石英砂岩、云母石英片岩; 花岗岩体包括了二长花岗岩、花岗闪长岩和石英二长闪长岩。
- 2) 花岗岩形成时代为 165 Ma, 即为中侏罗世时期侵入到元古宇地层。

3) 通过岩石类型划分和岩石物理特征研究,建立了潜山岩性的测井识别方法。不同岩石类型测井响应特征不同,中新元古界围岩与花岗岩体的最大区别是:花岗岩由于岩浆结晶形成矿物组成相对均匀,自然伽玛平直;中新元古界围岩伽玛高齿状或低值小齿状(石英岩)。结合岩石密度和补偿中子交会特征可以进一步识别岩性。

4) 潜山主要储集岩为花岗岩体,与岩体自身矿物组成密切相关,花岗岩体主要由石英、斜长石、碱性长石等浅色矿物组成,而且长石含量达到 55%~70%,岩石脆性大,抗风化能力弱易形成储层;而围岩主要矿物成分为石英、云母类矿物,石英抗风化能力强,而黑云母则蚀变形成绿泥石等柔性矿物,因此,不易形成有效储集空间。

5) 储集空间类型主要为风化淋滤、构造破碎等形成的破碎颗粒间孔、溶孔、收缩缝、溶解缝和构造裂缝等,储集空间组合类型以裂缝+孔隙型为主,次为裂缝型。

6) 花岗岩体油藏以风化壳型为主,次为构造型,有利油气富集区域为勘探区域为构造高部位和大断裂附近。

参考文献 (References)

- [1] 杨明慧 (2008) 渤海湾盆地潜山多样性及其成藏要素比较分析. *石油与天然气地质*, **5**, 623-638.
- [2] 万桂梅, 汤良杰, 周心怀, 等 (2009) 郯庐断裂带在渤海湾海域渤东地区的构造特征. *石油学报*, **3**, 1-2.
- [3] 龚再升, 蔡东升, 张功成 (2007) 郯庐断裂对渤海湾海域东部油气成藏的控制作用. *石油学报*, **4**, 1-2.
- [4] 张岳桥, 赵越, 董树文, 等 (2004) 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段. *地学前缘*, **3**, 123-133.
- [5] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等 (2007) 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, **11**, 1449-1461.
- [6] 邱家骧 (1985) 岩浆岩岩石学. 地质出版社, 北京, 249-250.
- [7] 路凤香, 桑隆健 (2002) 岩石学. 地质出版社, 北京, 54-55.
- [8] Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., Li, H.M., Günther, D. and Wu, F.Y. (2004) Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **28**, 353-370.
- [9] 吴福元, 杨进辉, 柳小明 (2005) 辽东半岛中生代花岗岩岩浆作用年代学格架. *高校地质学报*, **3**, 305-307.
- [10] 宋柏荣, 胡英杰, 边少之, 等 (2011) 兴隆台古潜山结晶基岩油气储层特征. *石油学报*, **1**, 60-65.
- [11] 任延广, 王成, 等 (2011) 油气储层评价方法. 石油工业出版社, 北京.
- [12] 李振宏, 郑聪斌 (2004) 古岩溶演化过程及对油气储集空间的影响. *天然气地球科学*, **3**, 249-251.
- [13] 王艳忠, 操应长, 等 (2006) 不整合空间结构与油气成藏综述. *大地构造与成矿学*, **3**, 326-333.
- [14] 吴亚军, 张守安, 等 (1998) 塔里木盆地不整合类型及其与油气藏的关系. *新疆石油地质*, **2**, 101-105.
- [15] 吴孔友, 查明, 等 (2002) 准格尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征. *石油勘探与开发*, **2**, 53-57.