

# Reservoir Characteristics of Mesozoic Granite in Penglai 9-1 and Prediction of Potential Development Area

Fengrong Wang

CNOOC Tianjin Branch, Tianjin  
Email: wangfr@cnooc.com.cn

Received: Nov. 11<sup>th</sup>, 2015; accepted: Nov. 25<sup>th</sup>, 2015; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by author 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

We made major breakthroughs in exploration in buried hills of Penglai 9-1 oilfield in Bohai basin. There is good oil-gas show in granite, which already forms oil-gas pools. However, there are some uncertainties in this set of granites, such as forming time, attitude, distributing scope, lithology characteristic, reservoir space types, major controlling factor of reservoir and so on. Systematic observation, description of drilling cores, sidewall cores and cuttings, zircon U-Pb dating, petrography and geochemistry studies show that the granite is a Mesozoic acid intrusion in Proterozoic strata. The analyses such as casting thinsection observation and physical property analysis show that the reservoir space types in the granite are broken intergranular pores, dissolution pores, weathering fractures, structural fractures, etc. and it is mainly a pool of weathering crust which is strongly transverse homogeneous lithologic petroleum reservoir whose lower cores and fractures develop badly. Combined with logging and seismic method, we also studied the intrusive direction and scale of the granite, which built solid foundation for declaring the reserves of oil and gas in the granite and had instructive meanings for the study of reservoir distributing in the similar Penglai 9-1 granites and crystal basement rock.

## Keywords

Penglai 9-1 Oilfield, Granite, Reservoir Characteristics

---

# 渤海蓬莱9-1中生代花岗岩储层特征及有利区带分析

王凤荣

中海油天津分公司, 天津

Email: wangfr@cnooc.com.cn

收稿日期: 2015年11月11日; 录用日期: 2015年11月25日; 发布日期: 2015年11月30日

## 摘要

渤海湾盆地蓬莱9-1油田潜山勘探获得重大突破, 在花岗岩中见到较好油气显示, 单井试油获得工业油气流。然而, 对该套花岗岩的形成时代、产状、分布规模、岩性特征、储集空间类型、储层主控因素等并不十分清楚。本文通过对潜山钻井取心、井壁取心、岩屑的系统观察、描述以及选取样品进行单颗粒锆石U-Pb同位素定年、岩相学鉴定等测试, 确定该花岗岩为中生代时期的侵入到元古宇地层中的酸性侵入体。进一步采取铸体薄片鉴定、物性分析等测试手段确定储集空间类型为破碎粒间孔、溶孔、风化收缩缝、构造裂缝等, 主要以潜山风化壳油气藏为主, 风化花岗岩中下部孔隙和裂缝发育较差, 横向非均质性强, 为岩性油气藏模式。结合测井和地震等手段, 对侵入体侵入方向、侵入规模等进行了研究, 为花岗岩体储量申报奠定了扎实的基础, 同时, 对类似蓬莱9-1花岗岩体以及结晶基岩有利储层分布研究, 具有重要的借鉴意义。

## 关键词

蓬莱9-1油田, 花岗岩, 储层特征

## 1. 引言

蓬莱9-1油田位于庙西北凸起之上, 毗邻渤东凹陷和庙西北洼, 油源充足, 油气成藏条件比较优越。新近系(明化镇组和馆陶组)直接披覆在元古宇古潜山之上, 具有圈闭面积大, 埋藏浅等特点。受辽河油田潜山成功勘探的影响[1]-[3], 认为该区潜山具备油气富集的有利条件, 是勘探的一个重点目标。蓬莱9-1潜山勘探钻遇大套花岗岩体, 并且油气显示较好, 而元古宇浅变质的围岩无油气显示或显示极差。元古宇变质石英砂岩、碳酸盐岩以及太古宇的高级变质岩和晚期侵入到太古宇中的中、酸性侵入体形成的油气藏在国内较为常见[4]-[6], 而单纯的侵入到中新元古界地层中的花岗岩侵入体型油藏类型较为罕见。花岗岩体成藏的主控因素、岩体的空间展布以及油气富集规律等成为蓬莱9-1潜山油气藏勘探开发的重点。本文主要利用钻井取心、井壁取心、岩屑等, 运用岩石铸体薄片鉴定、单颗粒锆石定年、物性分析等实验测试手段获得的基础数据资料为基础, 结合测井、地震等技术, 对蓬莱9-1潜山岩性特征、储层以及岩体的空间展布等进行了详实的论述, 并重点对花岗岩侵入体岩石类型的划分、岩石相变及储层成因类型、物性特征等进行剖析, 明确了蓬莱9-1油田潜山勘探方向, 为花岗岩体储量申报奠定了扎实的基础。同时, 本文研究形成的技术方法及研究结果, 对类似地区的花岗岩储层以及结晶基岩储层研究, 具有一定的借鉴意义。

## 2. 地质概况

蓬莱 9-1 油田位于渤海中东部的庙西北凸起上，紧邻富生烃的渤海凹陷和庙西北洼陷，具有双凹供烃、凸起聚烃的优越成藏背景[7] (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、印制、燕山和喜马拉雅运动等多期构造及改造作用[8]。早古生代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[9]-[11]，进入岩石圈减薄的峰期[12]，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

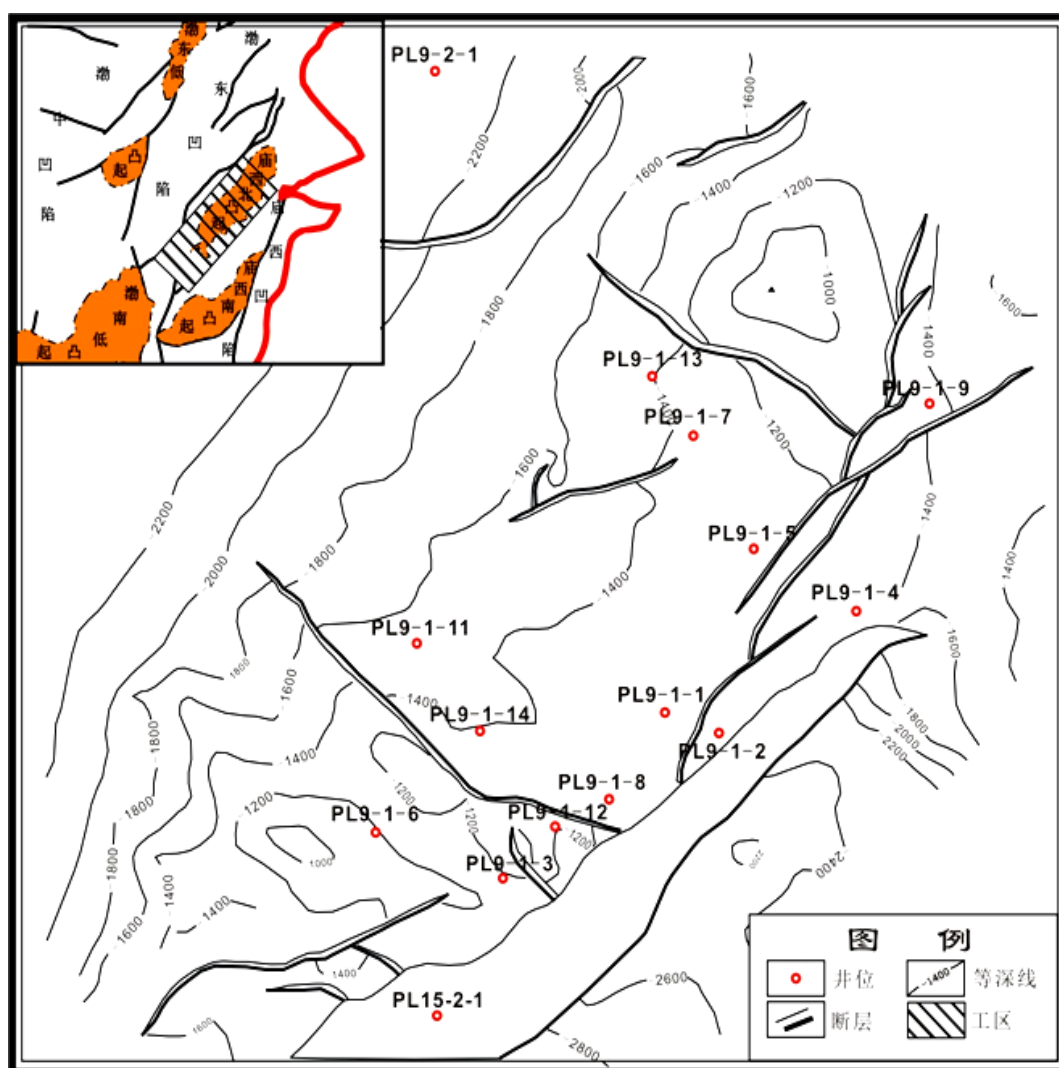


Figure 1. The explore array map for Penglai 9-1 structure

图 1. 蓬莱 9-1 构造勘探部署图

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成良好的储层。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. 潜山地层及花岗岩体形成时代和储层成因

#### 3.1. 潜山地层及花岗岩体形成时代

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)、新近系馆陶组和元古宇(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 200M 光学系统的联机上完成。激光束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ , 激光剥蚀样品的深度为 20~40  $\mu\text{m}$ , 详细分析步骤和数据处理方法参见文献[13]。云母石英片岩获得了三个年龄集中段(表 1、图 2), 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 2、图 3), 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 164.6 Ma, 形成于中侏罗世。与吴福元等[14], 研究的中国东部花岗质岩浆作用的划分的第二个阶段(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[12]。

#### 3.2. 花岗岩储层成因机理

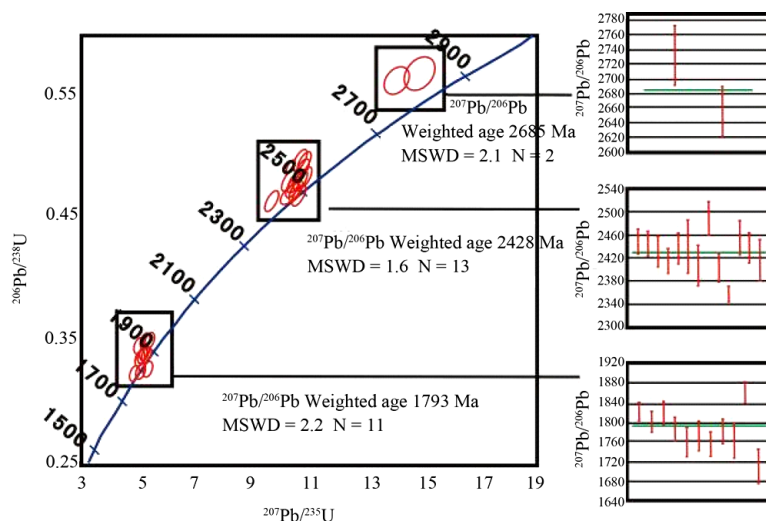
花岗岩体在漫长的地质历史时期, 经历了岩体结晶收缩、风化剥蚀、溶蚀淋滤、构造破碎等改造, 储集空间较发育。尤其是潜山在新生代新近系馆陶组时期才被覆盖, 长期风化淋滤, 物理和化学成因的储集空间发育, 岩溶作用相当强烈。李振宏[15]等研究裸露期风化壳岩溶模式, 从上到下大致可分五个带: 残积带、垂直淋滤带、水平深流溶蚀带、溶蚀沉积共生带和滞留带, 该种模式虽然是在研究碳酸盐岩储层时建立起来的, 但同样适用于火成岩储层。火成岩岩体易形成收缩缝, 在构造应力作用下, 易形成构造裂缝, 经历较长时期的风化淋滤, 形成的风化淋滤带厚度仅次于碳酸盐岩, 但远大于砂质岩。王艳忠[16]等人对不整合面上下岩性特征进行了研究, 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[17], 上

**Table 1.** LA-ICP-MS U-Pb analytical results of the mica quartz  
**表 1.** 云母石英片岩样品 LA-ICP-MS U-Pb 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	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$
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

**Table 2.** LA-ICP-MS U-Pb analytical results of monzogranite  
**表 2.** 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 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$
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 2.** U-Pb concordia diagram of zircons in the mica quartz  
**图 2.** 云母石英片岩锆石 U-Pb 谐和图



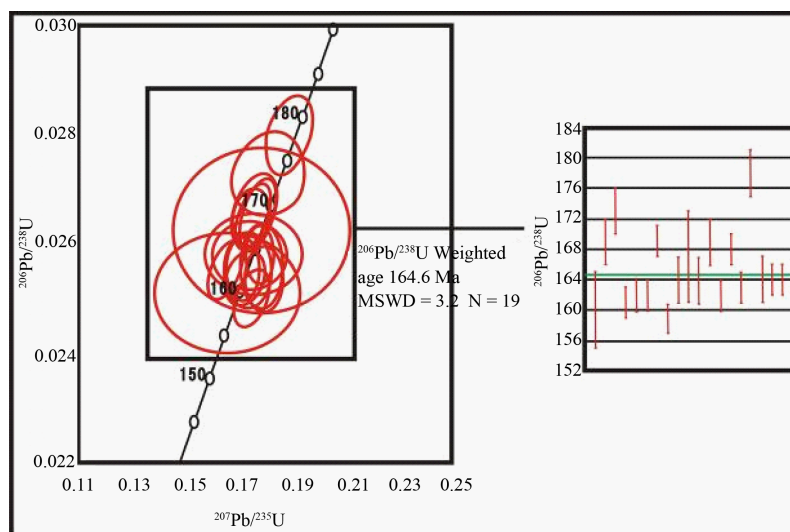


Figure 3. U-Pb concordia diagram of zircons in monzogranite  
图 3. 二长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

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风化裂缝和溶蚀孔洞[18]，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。

## 4. 花岗岩体的岩性识别

### 4.1. 岩相学鉴定

蓬莱 9-1 构造在项目研究的 2012 年，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。潜山目的层取心 5 口井，4 口井取到酸性侵入体(即 PL9-1-2、PL9-1-5、PL9-1-11、PL9-1-13)，同时有三口井旋转井壁取心取到酸性侵入体(PL9-1-2、PL9-1-4、PL9-1-5)，为进一步认识花岗岩体奠定了基础。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。岩矿鉴定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。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[19] [20]。

### 4.2. 岩性的测井识别

变质岩和岩浆岩岩石类型的测井识别有人做过研究[6]，并初步建立了岩浆岩和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  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量高，不含  $\text{FeO}$  和  $\text{MgO}$ ，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  $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$  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, 硅铝矿物矿物含量增加, 反映在测井曲线上自然伽玛质增大, 原因是根据鲍文反应序列[9], 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。本次对花岗岩侵入体的研究, 建立了测井曲线与具体岩石类型(如二长花岗岩、花岗闪长岩等)的对应关系, 同时还建立了不同围岩的测井响应特征(表 3)。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 4。

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%。

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  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 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”。

Table 3. The logging identification standard of oilfield PL9-1

表 3. 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 ( $\text{g/cm}^3$ )	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



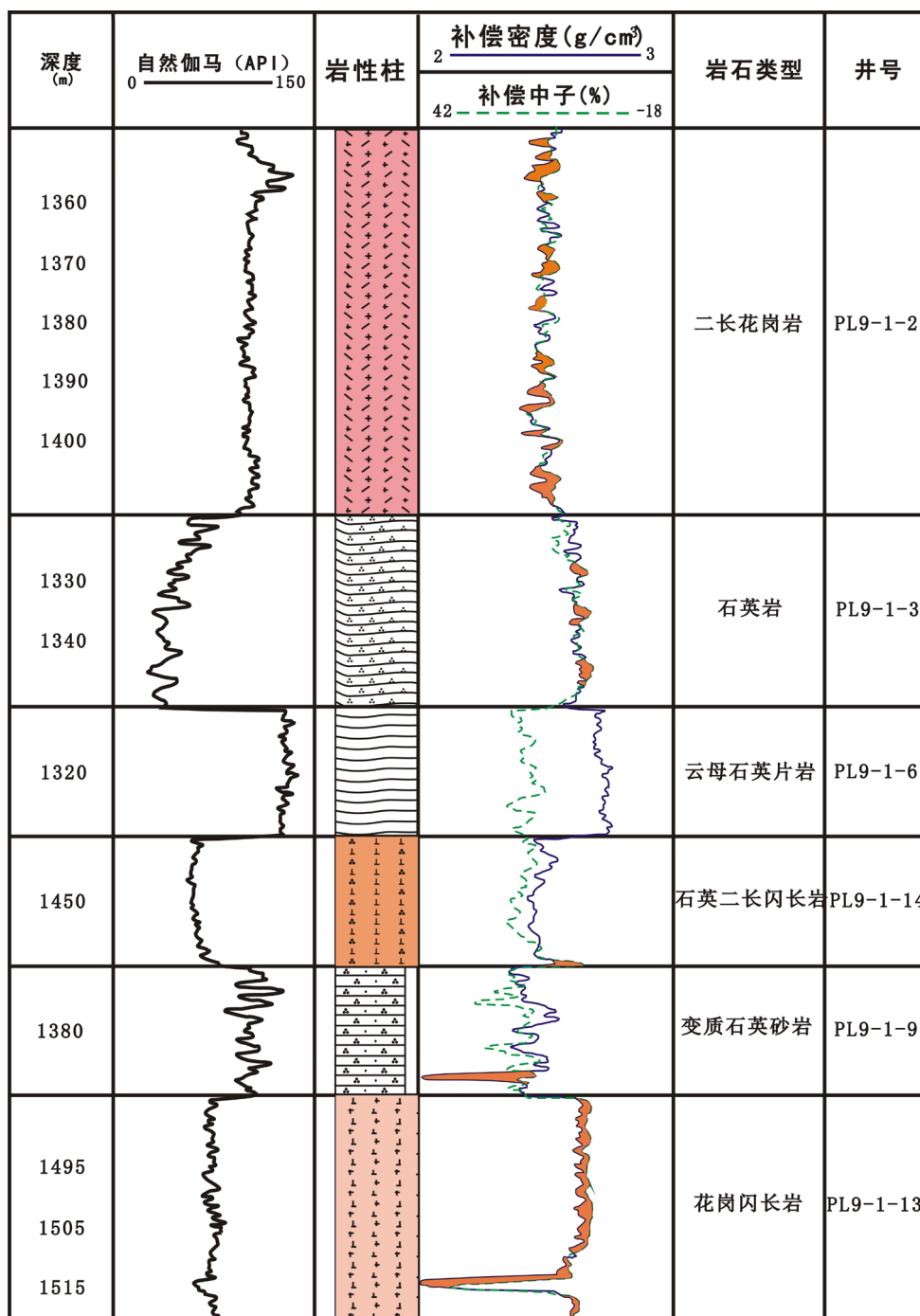


Figure 4. Logging response characteristics of major rock types

图 4. 主要岩石类型测井响应特征

### 4.3. 花岗岩体的空间展布

花岗岩侵入体在侵入过程中由于岩浆的分异作用，发生分离结晶，岩浆分离结晶的总趋势是愈到晚期，岩浆愈向富硅、富碱和铁代替镁的方向演化。花岗岩体岩性分布的特点是由东南向西北由二长花岗岩(PL9-1-1、PL9-1-2、PL9-1-4)演变为花岗闪长岩(PL9-1-5、PL9-1-11、PL9-1-13 等)，二长花岗岩为岩浆

分离结晶晚期的产物。根据鲍文反应原理,矿物结晶顺序:橄榄石→Ca质斜长石(Mg辉石)→Ca-碱质斜长石(Mg-Ca辉石)→碱质-Ca斜长石(角闪石)→碱质斜长石(黑云母)→钾长石→白云母→石英,同样是越晚期形成的岩石钾长石和石英越多。在流动分离结晶过程中,早期结晶的矿物容易随着流体带走,也就是岩浆在地下深处早期可形成少量斜长石等晶体,在侵入到地层中随着岩浆的流动被带走,形成的岩石斜长石等含量较高,同时早期向前侵入的岩浆本身偏中性,形成的岩体会在岩体侵入的前端方向较末端富钾长石等。因此,根据岩浆流动分异作用的特点,推断,岩浆由东南部大断裂上升,向西北部侵入,造成东南部为二长花岗岩,西北部为花岗闪长岩(图5),同时岩浆在纵向上也具有结晶分析特点,PL9-1-13、PL9-1-5井等下部以石英二长闪长岩、石英闪长岩为主,向上过渡到花岗闪长岩和二长花岗岩。根据地震剖面反映的该岩体的形态、大小及与围岩的关系等,确定该岩体产状为岩盖。此花岗岩体岩盖整体为一旋转45°的正方形形态,只是在西南角向外有一定的延伸,本岩盖东南-西北轴长13.6 km,东北-西南轴长12.7 km,最长处17.1 km,总面积166 km<sup>2</sup>。

## 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6)。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。

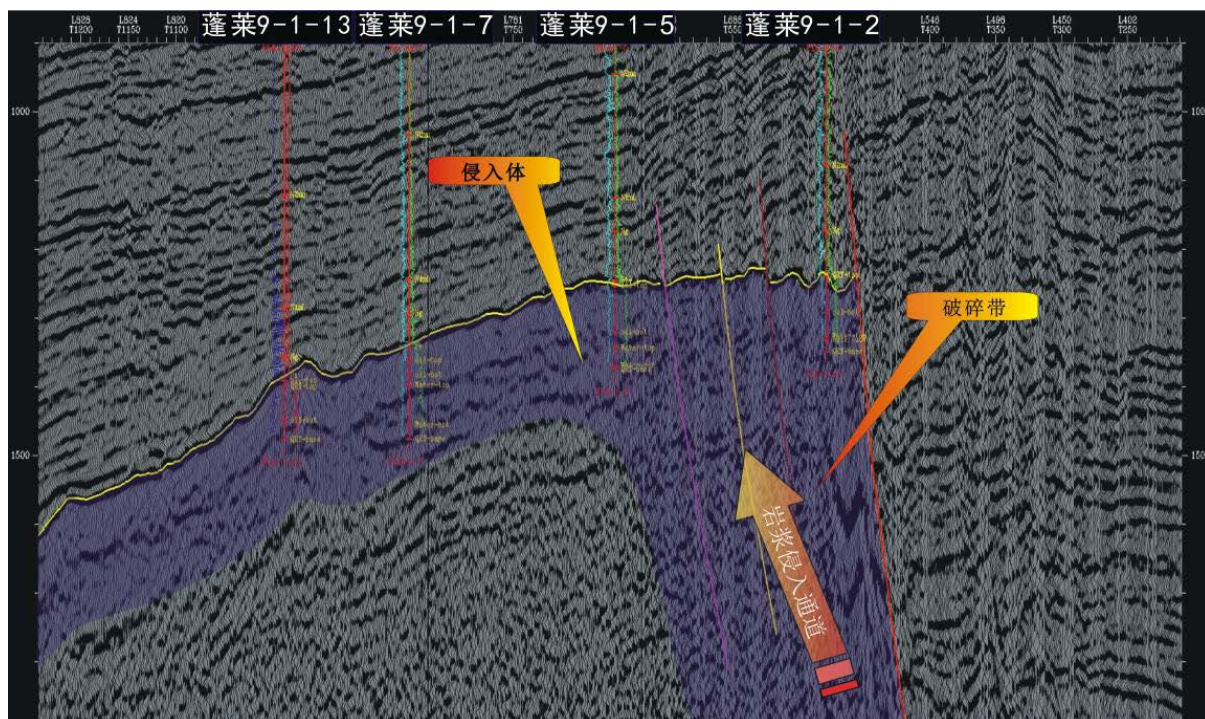
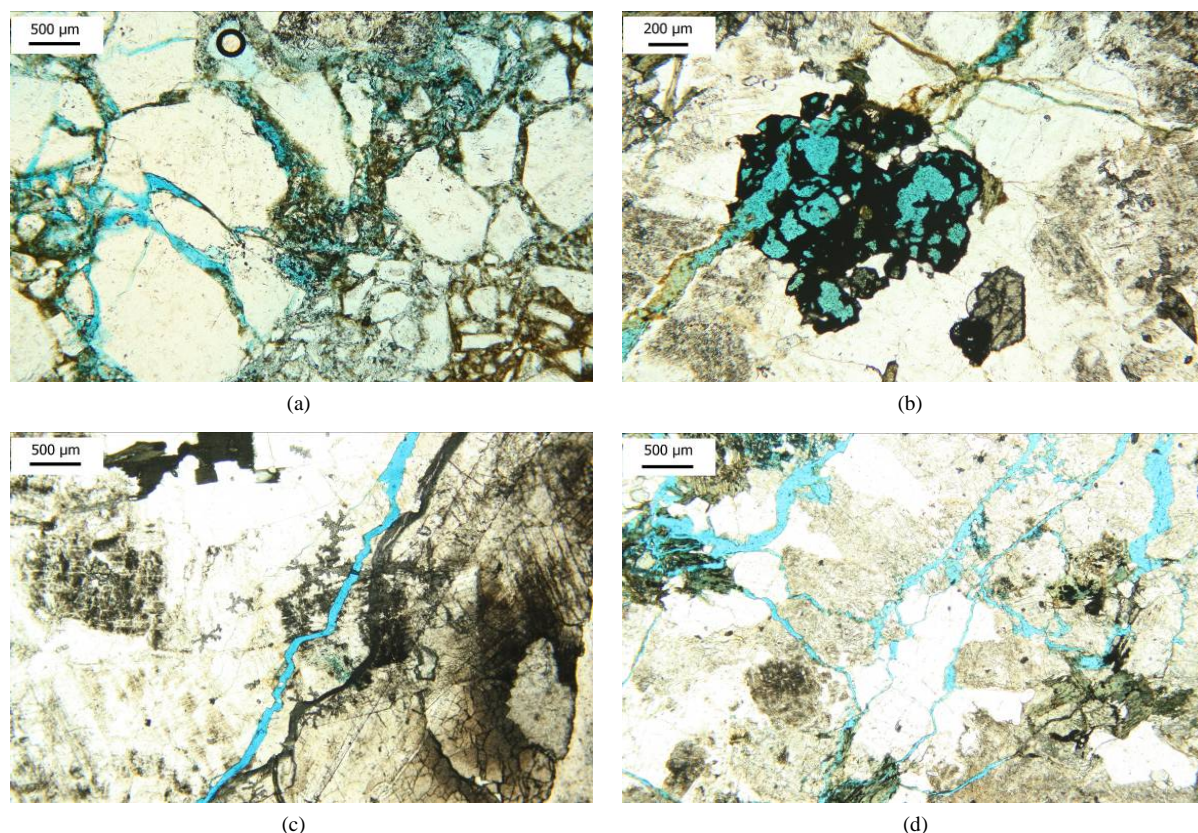


Figure 5. Cross-well seismic profile of Penglai 9-1-13 and Penglai 9-1-2

图5. 蓬莱9-1-13-蓬莱9-1-2联井地震剖面





**Figure 6.** The reservoir space types in the granite. (a) broken intergranular pores (PL9-1-2 well, 1285.0 m, Single-Mode polarizing), (b) dissolution pores (PL9-1-13 well, 1514 m, Single-Mode polarizing), (c) tectonic fractures (PL9-1-13 well, 1503.50 m, Single-Mode polarizing), (d) shrink-dissolve fractures (PL9-1-11 well, 1605.0 m, Single-Mode polarizing)

**图 6.** 花岗岩体储集空间特征。(a) 破碎粒间孔(PL9-1-2 井, 1285.0 m, 单偏光), (b) 溶孔(PL9-1-13 井, 1514 m, 单偏光), (c) 构造裂缝(PL9-1-13 井, 1503.5 m, 单片光), (d) 收缩-溶解缝(PL9-1-11 井, 1605.0 m, 单偏光)

## 5.2. 物性特征

对 8 口井, 106 块样品物性分析结果表明, 花岗岩体储层孔隙度 0.39%~25.4%, 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 0.07 mD~94.2 mD。其中, 大于 50 mD 占 4.9%, (10~50) mD 占 7.3%, (1~10) × 1 mD 占 4.9%, 1 mD 以下的占 82.9%。根据孔隙度、渗透率划分标准[21], 孔隙度以 III 类为主, 次为 I、II 类, 渗透率以 IV 为主。孔隙度、渗透率具有良好的相关性。

## 6. 储层有利区带分析

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 潜山花岗岩体单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄为 164.6 Ma, 为中生代侏罗纪中侏罗世时期侵入到元古宇地层中的侵入体。

2) 花岗岩侵入体主要岩石类型为二长花岗岩、花岗闪长岩和石英二长闪长岩, 岩体具有横向结晶分析和纵向结晶分析等特点, 在自然伽玛测井曲线上有很好的反映。

3) 花岗岩体在本区形成了很好的储层, 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。

4) 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。

5) 花岗岩体油藏以风化壳型为主, 次为构造型, 有利勘探区域为构造高部位和大断裂附近。

## 基金项目

国家重大科技专项(2011ZX05023-002, 2011ZX05023-006)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 谢文彦, 孟卫工, 张占文, 等. 辽河拗陷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.
- [2] 慕德梁. 辽河拗陷兴隆台古潜山深部油藏地质特征及勘探意义[J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 16-19.
- [3] 邢志贵. 辽河拗陷太古宇变质岩储层研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 1.
- [4] 郭建华, 刘辰生, 吴东生, 等. 大民屯凹陷静堡西侧油气成藏条件分析[J]. 中南大学学报, 2005, 36(2): 229-334.
- [5] 崔秀梅, 王建瑞, 等. 冀中拗陷新河突起变质岩油气成藏条件探讨[J]. 特种油气藏, 2010, 18(2): 29-33.
- [6] 宋柏荣, 胡英杰, 边少之, 等. 兴隆台古潜山结晶基岩油气储层特征[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 60-65.
- [7] 夏庆龙, 周心怀, 王昕, 等. 渤海蓬莱 9-1 大型复合油田地质特征及发现意义[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 15-23.
- [8] 杨明慧. 渤海湾盆地潜山多样性及其成藏要素比较分析[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 623-638.
- [9] 万桂梅, 汤良杰, 周心怀, 等. 郯庐断裂带在渤海湾海域渤东地区的构造特征[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 1-2.
- [10] 龚再升, 蔡东升, 张功成. 郯庐断裂对渤海湾海域东部油气成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 1-2.
- [11] 张岳桥, 赵越, 董树文, 等. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地质前缘, 2004, 11(3): 123-133.
- [12] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [13] Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., Li, H.M., Detlef, G. 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. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x>
- [14] 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用年代学格架[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 305-307.
- [15] 李振宏, 郑聪斌. 古岩溶演化过程及对油气储集空间的影响[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3): 249-251.
- [16] 王艳忠, 操应长, 等. 不整合空间结构与油气成藏综述[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(3): 326-333.
- [17] 吴亚军, 张守安, 等. 塔里木盆地不整合类型及其与油气藏的关系[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(2): 101-105.
- [18] 吴孔友, 查明, 等. 准格尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 53-57.
- [19] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 249-250.
- [20] 路凤香, 桑隆健. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 54-55.
- [21] 任延广, 王成, 等. 油气储层评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.