

中国东部裂谷盆地变质基底中的油气前景

——以辽河裂谷盆地基底变质岩潜山内幕油藏勘探为例

廖兴明^{1,2*}, 刘宝鸿^{1,2}, 廖光明³, 廖晓蓉⁴, 李理¹, 陈昌¹, 白东昆¹, 宁海翔¹, 吴昊^{1,2}, 王睿¹, 宇振全¹

¹中国石油辽河油田分公司, 辽宁 盘锦

²辽宁省地球物理学会, 辽宁 盘锦

³中国石化江苏油田分公司, 江苏 扬州

⁴中国石化西南分公司, 四川 成都

收稿日期: 2021年10月28日; 录用日期: 2021年11月23日; 发布日期: 2021年11月29日

摘要

辽河裂谷盆地, 位于渤海湾盆地东北隅。伴随渤海湾盆地的发生发展, 经历了多期次强烈的构造变动。特别是中生代以来, 郯庐断裂走滑、拉伸应力(场)的强烈作用, 形成多套裂缝系统叠加的储集体系和凹凸(隆起)相间分布的构造格局。构成裂谷盆地中受断层控制的潜山、凸起与生油凹陷(断陷)相伴或围绕分布的、有利于潜山油气藏形成的优越地质条件。在分析辽河裂谷盆地兴隆台潜山巨厚的“潜山内幕”油藏形成的主控因素和分布特点后, 提出变质岩潜山内幕油藏成藏体系概念。“源、储、输、盖”等四大要素, 构成基底变质岩潜山油藏不可或缺的成藏体系。有效耦合的成藏体系埋藏有多深, 变质岩“潜山内幕”油藏埋藏就可能有多深; 成藏体系中各要素的优劣、有效耦合程度, 影响和控制了变质岩潜山油藏的分布特点和丰度; 源岩的性质及含有物(水层、油层、生烃岩)不同, 导致潜山内幕油藏分布的复杂性和隐蔽性; 在纵向上, 可能出现油、水层倒置或交互发育(ZG2); 也可能出现上部为水层或无任何油气显示现象。但不能否认潜山内幕油藏的存在; 在平面上, 可能出现沿深大断裂作不规则的“团块”状分布。因此, 按照变质岩成藏体系的有效耦合程度及源岩性质进行综合评价、部署。就能使我们对变质岩潜山“内幕油藏”的勘探, 从偶然到必然、从被动到主动、从迷茫到清晰、从等待观望到主动出击的思想转变。同时, 积极开展适应变质岩潜山内幕油藏勘探的技术创新; 科学有序引进不受复杂地质条件影响、直接找油的“微轻子石油探测技术”。将大大提高变质岩潜山勘探的成功率和信心, 推动和加快中国东部裂谷盆地变质岩潜山石油勘探工作向纵深发展。促进石油地质储量和产量再上新台阶; 石油工业发展再创新辉煌。确保国家能源战略安全、缓解石油对外依存度具有重要的政治经济意义。

关键词

变质岩, 油气资源, 潜山内幕, 裂缝, 耦合

Oil and Gas Prospects in the Metamorphic Substrate of the Rift Basin in Eastern China

*第一作者。

文章引用: 廖兴明, 刘宝鸿, 廖光明, 廖晓蓉, 李理, 陈昌, 白东昆, 宁海翔, 吴昊, 王睿, 宇振全. 中国东部裂谷盆地变质基底中的油气前景[J]. 自然科学, 2021, 9(6): 1019-1029. DOI: 10.12677/ojns.2021.96110

—Taking the Exploration of the Buried Hill Inner Reservoir of Substrate Metamorphic Rock in the Liaohe Rift Basin as an Example

Xingming Liao^{1,2*}, Baohong Liu^{1,2}, Guangming Liao³, Xiaorong Liao⁴, Li Li¹, Chang Chen¹, Dongkun Bai¹, Haixiang Ning¹, Hao Wu^{1,2}, Rui Wang¹, Zhenquan Yu¹

¹China Petroleum Liaohe Oilfield Branch, Panjin Liaoning

²Liaoning Geophysical Society, Panjin Liaoning

³Sinopec Jiangsu Oilfield Branch, Yangzhou Jiangsu

⁴Sinopec Southwest Branch, Sichuan Chengdu

Received: Oct. 28th, 2021; accepted: Nov. 23rd, 2021; published: Nov. 29th, 2021

Abstract

Liaohe Rift Basin, is located in the northeast of Bohai Bay Basin. With the development of Bohai Bay Basin, it has experienced many periods of strong tectonic changes. Especially since the Mesozoic, the strong effect of the radon fracture slip and stretch stress (field) has formed the structure pattern of the distribution between the storage system and the bump (uplift) phase of multiple sets of crack system superimposed and constitutes a buried hill controlled by faults in the Rift Basin, a bulge accompanied by a natural oil depression (break) or a superior geological condition that is conducive to the formation of the buried hill oil and gas reservoir. After analyzing the main control factors and distribution characteristics of the formation of the huge “subliminal mountain inside” reservoir in Xinglongtai buried hill in the Liaohe Rift Basin, the concept of the reservoir formation system of the sub-rock buried hill is put forward: “source, storage, transmission, cover” and other four elements, which constitutes the base of the deterioration rock buried hill reservoir indispensable storage system. How deep is the effective coupling of the reservoir system, how deep the reservoir of the “hidden mountain” reservoir of the metamorphic rock may be; The advantages and disadvantages of the elements in the reservoir system and the degree of effective coupling effect and control the distribution characteristics and abundance of the buried hill reservoir of the metamorphic rock. The nature and contents of the source rock (water layer, oil layer, hydrocarbon rock) are different, resulting in the complexity and concealment of the distribution of the buried hill reservoir: Upside down, oil, water layer inversion or interactive development (ZG2) may occur, or the upper layer may appear as a water layer or without any oil and gas display. But it cannot deny the existence of the hidden mountain inside the reservoir; the plane, irregular “mass” distribution along deep fractures may occur. Therefore, according to the effective coupling degree and the nature of source rock, the comprehensive evaluation and deployment are carried out according to the effective coupling degree of the metamorphic rock formation system. It can make us the credibility of the exploration of the “inside reservoir” of spoiled rock buried hill, from the chance to necessity, from passive to active, from confused to clear, from waiting to see to active attack of the ideological transformation. At the same time, actively carry out the technical innovation to adapt to the exploration of the inner reservoir of the metamorphic rock potential mountain; Scientific and orderly introduction of “micro-light sub-oil detection technology” is not affected by complex geological conditions and is directly oil-seeking. It will greatly improve the success rate and confidence of the exploration of metamorphic rock potential mountains, and promote and accelerate the development of oil exploration of metamorphic rock potential mountains in the Rift Basin in eastern China and promote oil reserves and production to a new level, oil industry development and brilliant innovation. It is of great political and economic significance to ensure the national energy strategic security and ease the dependence of oil on the outside world.

Keywords

Metamorphic Rock, Oil and Gas Resources, Buried Hill Insiders, Cracks, Coupling

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

1972 年 LH 油田 X213 井和 1975 年 HB 油田 R4 井先后获高产工业油气流后, 古潜山油藏勘探曾风靡一时。经过 30 余年的多次勘探会战和研究, 中国东部裂谷盆地各油田, 都不同程度地发现规模不等的中生界火山岩、古生界和中新元古界灰岩、太古界变质岩等古潜山油藏(田), 但多属于风化壳(指潜山表层, 经长期风化剥蚀、淋滤作用, 变成质地疏松 + 裂缝较发育 + 裂缝欠发育的致密坚硬层组成)型油藏。

风化壳油藏, 一般规模较小、复杂多变。如 LH 油田兴隆台变质岩潜山风化壳油藏。自 X213 井获高产工业油气流后。先后钻评价井 20 余口。钻井过程中油气显示都很活跃, 测试产量 $0.04 \text{ m}^3 \sim 100+ \text{ m}^3$ 之间。仅 8 口井获工业性油气流。控制含气面积约 2 km^2 。因此使古潜山勘探一度处于迷茫、等待观望的停止状态。

随着勘探技术进步和勘探思路创新。笔者以油田丰富的潜山勘探、研究成果和野外实地观察(医巫吕山山沟里花岗岩裂缝的分布发育特点)为基础; 特别是低潜山勘探成果的启示。研究并产生找潜山内幕油藏的设想和建议(中央凸起): 1) 分析研究认为¹, 基底变质岩经历多期次构造断裂活动, 可能发育多套裂缝系统, 形成良好的储集空间。只要能与烃源岩有机配合(烃源岩与变质岩储层接触), 就可能形成多套相对独立的油藏系列; 供油窗底界有多深, 潜山内幕油藏埋藏就可能有多深; 2) 随着 3D 地震资料品质的提高, 先后发现一批变质岩低潜山, 特别是兴隆台潜山周边的低潜山, 都不同程度地获高产工业性油气流: ① 在兴隆台潜山西侧的曙光低潜山带, 钻探 S110 井, 在变质岩潜山(Ar)获工业油气流。井底未见明显油水界面。比兴隆台潜山风化壳油藏的含油底界低 1133 m。它与兴隆台潜山隔“洼”(洼陷)相望。预示着兴隆台潜山风化壳油藏的含油底界(-2720 m)之下的潜山内幕可能有油气聚集。因此曾(1996 年)提出兴隆台潜山加深钻探的建议; ② 在兴隆台潜山带北、南高点的陈家(CG1)和马圈子(MG1)低潜山(图 2(a))。获不同程度的油气显示和工业性油气流, 含油底界(均未见明显油水界面)分别比潜山带中部的兴隆台潜山风化壳油藏的油层底界低 1549 m 和 1361 m; 这些资料都表明兴隆台潜山内幕可能形成潜山内幕油藏。为了解潜山带的整体含油性[1], 在主体部位, 钻风险探井 XG7 井。揭露太古界变质岩 1640 m, 油气显示井段约 1540 m。测试三段, 均获工业性油气流。因此在风化壳油藏之下, 发现了巨厚的潜山内幕油藏。探明石油地质储量超过亿吨。

随后, 在中央凸起赵家潜山、大民屯凹陷 S189、东部凹陷茨榆坨潜山 Z110 井, 相继发现古潜山内幕油藏。从而, 揭示了基底变质岩潜山内幕蕴藏着丰富的油气资源, 拓展了新的勘探领域。

但是, 目前对变质岩潜山内幕油藏成藏主控因素及成藏要素复杂的耦合关系和源岩的多样性认识不足; 地震勘探技术对变质岩潜山内幕多套裂缝发育特点的刻画及其含有物预测的可信度较低或不可能等原因, 使变质岩潜山内幕油藏勘探, 还不同程度地处于迷茫、等待、观望和碰运气的思想状态。

本文旨在以辽河拗陷兴隆台潜山内幕油藏勘探思路的渐进过程和丰富成果为例。通过主控因素和分布特点的分析后, 提出构成变质岩潜山内幕油藏成藏体系四要素的有效耦合和源岩的多样性, 影响和决定了

¹ 廖兴明. 辽河断陷中央凸起石油勘探的思考与建议[Z]. 2005 年初.

变质岩潜山内幕油藏分布的复杂性、隐蔽性和特殊性。因此，应创新或引进适应基底变质岩体油气勘探的新技术。为推动和加快中国东部裂谷盆地基底变质岩古潜山内幕油藏勘探，提供重要的参考资料和风化壳油藏加深勘探的理论依据。对确保国家能源安全、缓解石油对外依存度具有重要的政治经济意义。

2. 区域地质背景

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北隅(图 1(b)7)。是在太古界及下元古界褶皱变质基底上发育起来的中-新生代叠加型裂谷盆地。盖层厚度约 14,000 m [2]，包括中、新元古界、古生界、中生界及新生界地层。在大地构造上，位于华北地台(板块)中东部(图 1(a))。

华北地台经历了多期次[2] [3]构造运动。从中、新元古代-新生代，主要经历了晋宁、加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅等强烈的构造运动及不同方向的板块汇聚、俯冲和郯庐断裂的走滑、拉伸等强烈的应力(场)作用下，使基底变质岩形成多套裂缝系统和多种结构类型潜山：太古界变质岩；中生界 + 太古界变质岩；古生界 + 太古界变质岩；中生界 + 古生界 + 太古界变质岩和古生界 + 中新元古界 + 太古界变质岩等潜山类型。

中生代以来，由于郯庐断裂的活动，使前第三系基底形成北北东-北东和近东西向的走滑拉分盆地和凸(隆)凹相间的构造格局(图 1(b))。其中凸(隆)起，受断层控制形成地垒状和翘倾状潜山的基础；凹陷(断陷)区多为地堑状或箕状，接受 4000~8000 m 的中生界(局部)、第三系沉积。其中下第三系为主要的生油岩系。即是古潜山的油源层，也是良好的盖层。

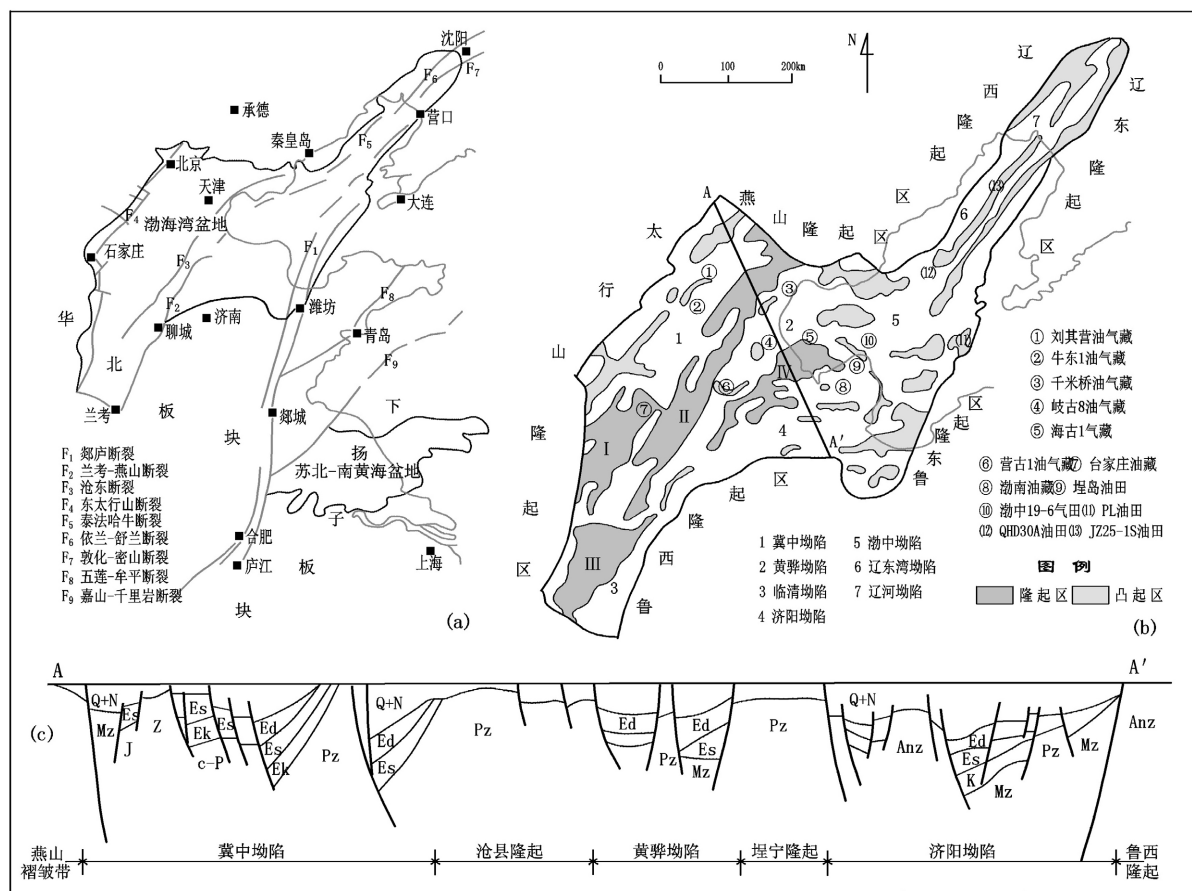


Figure 1. The tectonic location of the Bohai Bay Basin and its raised distribution map (base map is according to [4])
 图 1. 渤海湾盆地地区构造位置及其凸起分布图(底图据[4])

辽河裂谷盆地在始新世沉积时期,由于郯庐断裂在辽河段(台安-大洼断层)的强烈活动,使兴隆台潜山从中央凸起滑落至西部凹陷中央,形成走向北东、呈孤峰状展布的兴隆台潜山带,从北至南被近东西向断层切割成陈家、兴隆台和马圈子三个潜山(图 2(a))。四周被清水、陈家、盘山洼陷和冷东断槽等生油洼陷围限。 E_2S_3 生油岩系围绕潜山分布并超覆或披覆其上,有利于古潜山油藏形成。

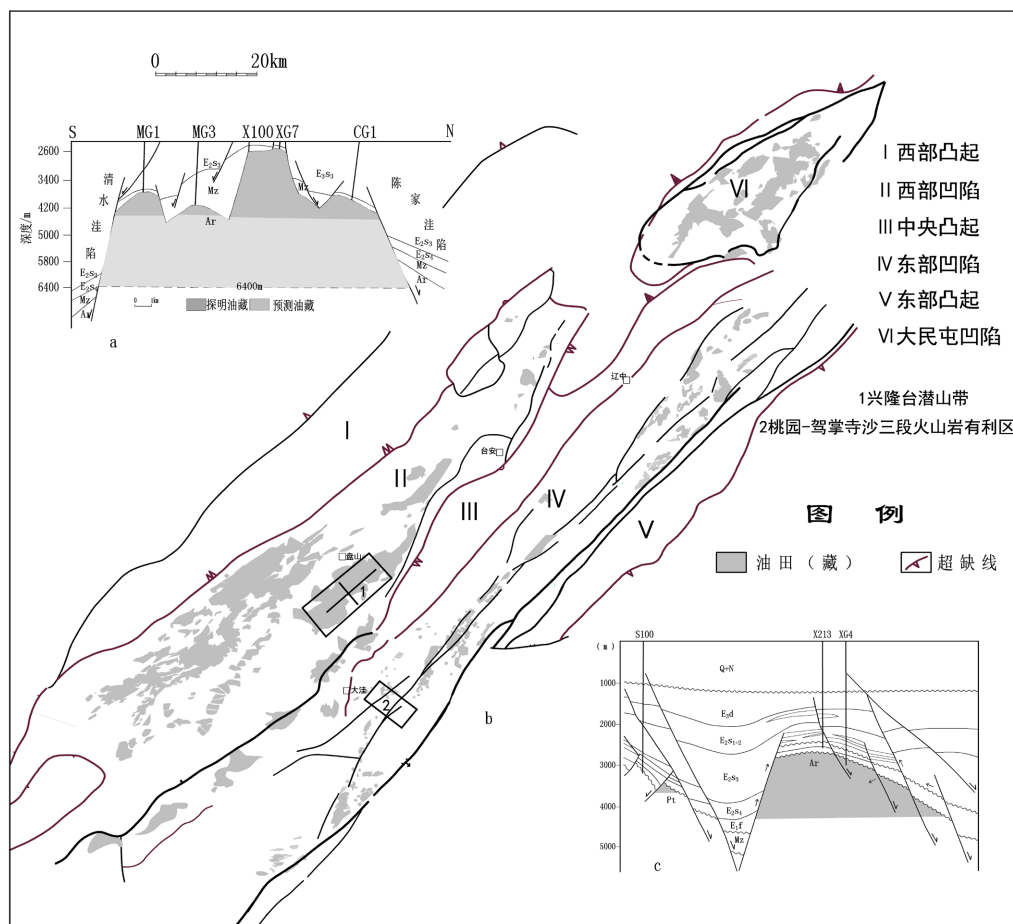


Figure 2. The division of the structure unit of the Liaohe depression

图 2. 辽河拗陷构造单元划分图

3. 辽河裂谷盆地兴隆台潜山内幕油藏形成的主控因素及分布特点

3.1. 兴隆台变质岩潜山内幕油藏主控因素分析

3.1.1. 变质岩潜山裂缝发育特点

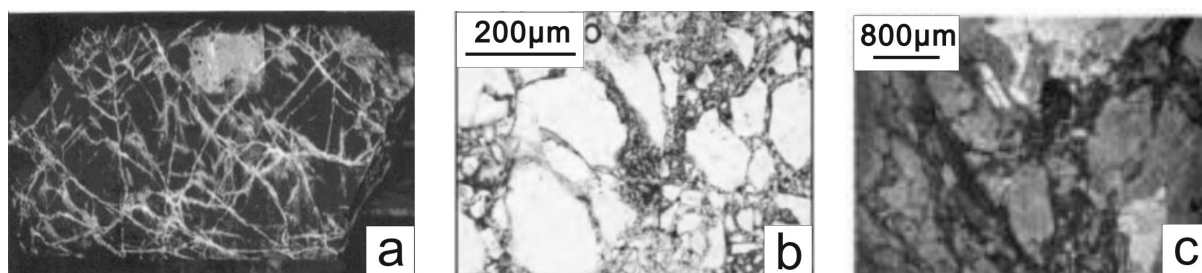
裂缝系统是基底变质岩良好的储集空间,它的发育程度是影响和控制变质岩潜山内幕油藏形成的基础和关键。

1) 岩性特点

据 XG7 井揭露的 1640 m 变质岩的岩屑录井、取芯和薄片鉴定等资料分析,兴隆台潜山目前揭露的岩类有区域变质岩、混合岩和侵入岩岩脉组成。其中储集岩包括黑云斜长片麻岩、混合岩、混合片麻岩、混合花岗岩、角闪混合岩、碎裂岩及花岗斑岩、闪长玢岩等,非储集岩包括角闪岩、斜长角闪岩、辉绿岩、煌斑岩等[1]。

2) 物性特点

据岩心观察、薄片鉴定及成像测井等资料综合分析，兴隆台太古宇古潜山储层为宏观裂缝、微观缝洞、溶蚀型孔洞缝以及解理缝、晶间孔缝等，具有双重孔隙结构的孔隙-裂缝型储层。基质孔隙度 4.3%。裂缝孔隙度 0.4%。宏观裂缝较发育，多为高角度张开缝，开度为 0.1~0.2 mm 不等。并见多组裂缝呈网状分布(图 3)。据测井解释统计表明[1]，裂缝面倾角主要为 40°~70°的高角度缝。裂缝开度为 0.15~3.75 mm。但早期裂缝多被充填，晚期裂缝常切割早期裂缝，反映出多期裂缝发育的特点。



(a) 辽河拗陷兴隆台潜山混合花岗岩，网状裂缝，兴古 7 井，4005.53 m (岩芯)；(b) 渤海海域 PL 油田，粒间孔及裂缝发育特点，2 井，1285 m (薄)；(c) 渤中 19-6 构造，碎裂花岗岩片麻岩，潜山内幕裂缝及溶蚀孔，BZ19-6-A 井，4169.5 m (薄片)。图片来自[1] [7] [8]的报告插图。

Figure 3. Swire metamorphic rock cracks and etching holes, holes, seam development features
图 3. 太古界变质岩裂缝及溶蚀孔、洞、缝发育特征图

研究认为[5] [6] [7]，裂缝的发育程度，受制于变质岩的岩性、暗色矿物含量、断裂活动强度和构造位置等。在同一应力(场)作用下，裂缝的产生和储集性能，遵循“优势岩性”规则。暗色矿物含量相对少、非均质性强的岩石在应力作用下易破碎产生裂缝形成良好的储集空间。而暗色矿物含量高的岩石，则不易产生裂缝而成为隔、盖层。按照“优势岩性”序列排序，同一地区，在“优势岩性”序列中靠前的岩石，裂缝发育程度和储集性能优于靠后的岩石；但同一岩石，在不同地区，在优势岩性序列中的位置不同。因此不同地区变质岩有不同的优势岩性序列，但都可能成为裂缝发育的优质储层。

3.1.2. 优质广布的烃源岩围绕潜山分布提供了充足的油源

对于基底变质岩来说，凡是含流体的岩石、生烃的岩石等，只要能与变质岩体有效耦合，都可能成为源岩。这里所说的烃源岩主要指能生成油气的烃源岩-生油层。在辽河西部凹陷，主要发育 E₂S₄、S₃、E₃S₁₊₂、d₂ 等四套生油层，其中 E₂S₄、S₃ 段为巨厚的(CG1 井 S₃ 厚达 1553 m)主力生油层，而且是围绕甚至超覆或披覆在兴隆台古潜山上。是潜山的主要的油源层。这两套烃源岩是辽河拗陷，甚至于中国东部地区公认的优质广布的烃源岩。不仅为第三系油气藏的形成提供了丰富的油气资源，也是变质岩潜山油藏主要的源岩层。

3.1.3. 良好的输导体系

裂谷盆地的重要特点是断层十分发育，它与不整合面共同构成潜山内幕油藏的输导体系。兴隆台潜山主要发育有北东、北东东和近东西向三组断裂系统。断距 800~2000 m，是生油岩与潜山侧向接触的巨大大供油窗口，油气可直接进入变质岩体内部，有利于潜山内幕油藏形成。因此，不整合面、大断层及变质岩体内部相伴形成的次级断层、裂缝系统，共同构成良好而复杂的输导体系。有利于兴隆台变质岩潜山内幕油藏形成。

3.1.4. 良好的盖层有利于潜山内幕油藏保存

对于古潜山来说，都具有良好的盖层。一是被新地层掩埋而形成古潜山油藏的天然屏障-盖层；对于层状结构的负变质岩，大多具有暗色矿物含量高、晚期侵入岩的致密层段，亦可作为隔、盖层。兴隆

台潜山, 不仅被巨厚的 E_2S_3 及其以上的第三系地层掩埋, 形成良好的盖层, 使古潜山油藏不被破坏而保存下来; 而且在潜山内幕发育多层较致密的角闪岩类岩石[1] (图 4(a)), 对巨厚的潜山内幕油藏有一定的分隔和保存作用。

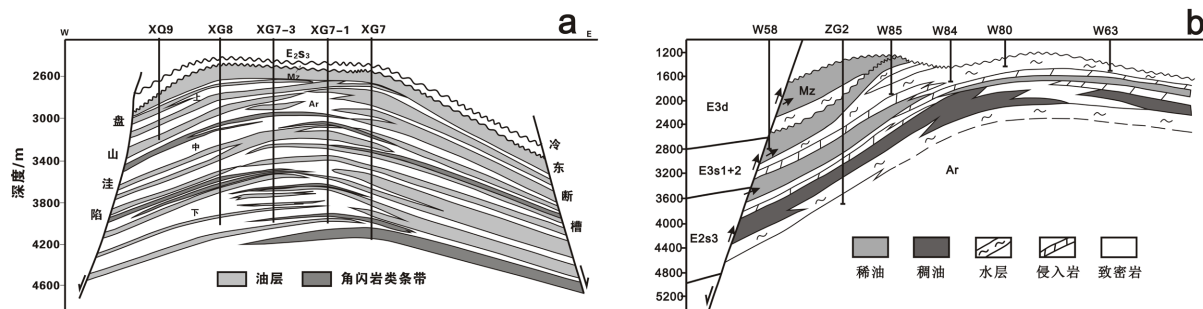


Figure 4. The inside reservoir profile of the Liaohe depression ((a) Xinglongtai buried hill, Base maps [1]; (b) Central bulge Zhaojia buried hill)

图 4. 辽河拗陷潜山内幕油藏剖面((a) 兴隆台潜山, 底图据[1]; (b) 中央凸起赵家潜山)

3.2. 辽河裂谷盆地基底变质岩潜山内幕油藏的分布特点

3.2.1. 兴隆台潜山内幕油藏

兴隆台潜山, 是变质岩潜山成藏体系耦合较好的潜山。油气富集程度较高。纵向上发育风化壳油藏和潜山内幕油藏。油水界面约-4670 m, 含油幅度达 2310 m。按照供油窗底界有多深或有效耦合的成藏体系有多深, 潜山内幕油藏就可能有多深的观点, 在油水界面以下, 还可能有油藏存在。值得进一步勘探和研究。

据 XG7 井, 测井解释油层 + 差油层 42 层 367.9 m。因此在约 1540 m 的油气显示井段内, 至少有 42 个裂缝系统发育段, 形成 42 套既独立而又有联系(断层、裂缝)的巨型储集体和裂缝型油藏。

另据兴隆台潜山的产量、压力资料分析[1], 由于暗色矿物含量较高的似层状角闪岩类岩石的分隔, 裂缝发育可分为上、中、下三段(图 4(a))。上层段产量(XG7, XQ9): 油 30.8~41.8 t; 气 1399~7042 m^3 ; 压力系数 1.17~1.24。中段(XG7): 油 73.5 t, 气 668 m^3 , 压力系数 1.14。下层段(XG7-1): 油 14.4 t, 气 5790 m^3 , 压力系数 1.05。资料表明, 兴隆台潜山内幕油藏, 是由多套既独立、又有联系的裂缝系统叠加形成的巨型裂缝性油藏。

3.2.2. 赵家潜山

位于辽河坳中央凸起西侧(图 2(b)III)。是继兴隆台潜山内幕油藏发现后的另一潜山内幕油藏。潜山西侧的台安 - 大洼断裂, 垂直落差达 6000 m 左右。形成下第三系烃源岩与中央凸起太古界变质岩直接接触的巨大供油窗口, 有利于潜山内幕油藏形成。部署 ZG1 风险探井获得成功。

ZG1 井, 完钻井深 4259 m, 钻迂中生界火山岩及砂泥岩地层约 1327 m。在 3090 m 钻迂变质岩潜山, 揭露变质岩厚度 1169 m, 其间夹数层煌斑岩、角闪岩、辉绿岩等侵入岩。电测解释油层 + 差油层 84 m/5 层, 水层 31 m/2 层。试油 2 层, 均获工业油流。① 3230.0~3274.0 m, 压后, 5 mm 油嘴, 油 27.48 t/d, 气 2549 m^3 /d, 累计产油 139.8 t。

赵家潜山油气水关系较复杂, 完钻 10 口探井中, 仅 4 口井(ZG1、2、3、5)在变质岩潜山内幕获不同程度的工业油气流。资料表明, ZG1 井为上油(稀)下水的正常油藏系统; 而与邻块的 ZG2 井(相距约 5 km), 自上至下, 依次为稀油层 - 水层 - 稀油层 - 稠油层和水层(图 4(b))的复杂油气藏组合关系。这可能是与潜山内幕裂缝系统耦合的源岩为含水层等所致, 也可能是在相对独立的裂缝系统中油气水重力分异作用形成的。总之, 说明基底变质岩潜山内幕油藏具有复杂性、相对独立的特点。

3.2.3. 大民屯凹陷变质岩潜山“负向构造”内幕油藏

S309、S27、J1 等井，分别在潜山之间的“负向构造”钻迂基底变质岩内幕油藏，揭露变质岩厚度 441~702 m，均获丰富油气显示和工业性油气流。其共同特点是 E₂S₄ 生油岩系直接披盖在基底变质岩上。由于生烃异常压力和上覆地层静压作用，把油气沿不整合面或裂缝系统压入基底变质岩中而形成的“负向构造”内幕油藏。

3.3. 变质岩潜山内幕油藏成藏体系概念

上述成果分析表明，基底变质岩潜山内幕油藏的形成，必须具备烃源岩、储集空间(裂缝、溶蚀孔洞缝)、输导体系(不整合面、断层及裂缝系统)和盖层(泥岩、致密岩层)等四要素(简称为源、储、输、盖)，共同构成变质岩潜山油藏成藏体系。它们之间的有机结合或有效耦合(耦合，是物理学中两个或两个以上体系间通过相互作用而彼此影响的现象)，是变质岩潜山(包括凸起)内幕油藏形成不可或缺的必要条件。变质岩成藏体系有效耦合的程度、储集空间发育的优劣、源岩的性质及含有物(油层、水层、生油岩层)等，决定了潜山内幕油藏的分布特点；有效耦合的成藏体系埋藏有多深，变质岩潜山内幕油藏埋藏就可能有多深；有多少个耦合的裂缝层段，就有多少个潜山内幕油藏系列；源岩为生油泥岩、灰质岩、含油或含水的砂质岩，则与之耦合的潜山内幕裂缝层段，可能出现油、水层倒置或交互发育的特点(如赵家潜山，图 4(b))。所以，当钻迂变质岩潜山无油气显示或水层显示，都不能否定潜山内幕油藏的存在。应从成藏体系有效耦合程度和源岩性质等进行综合判定。笔者认为这是变质岩潜山风化壳油藏加深勘探、寻找潜山内幕油藏的重要理论依据。

变质岩潜山成藏体系概念，较供油窗的底界(烃源岩底界)有多深，潜山内幕油藏埋藏就可能有多深的观点更完整、准确。能更好地为变质岩潜山内幕油气藏勘探提供理论依据。

3.4. 变质岩潜山油藏成藏模式

根据辽河拗陷变质岩潜山油藏的分布特点；烃源岩与基底变质岩的接触关系即烃源岩的供油方式，变质岩潜山成藏模式初步归纳为如下 3 种：① 双向供油模式，这种模式类型潜山，多为地垒状潜山(图 5)，

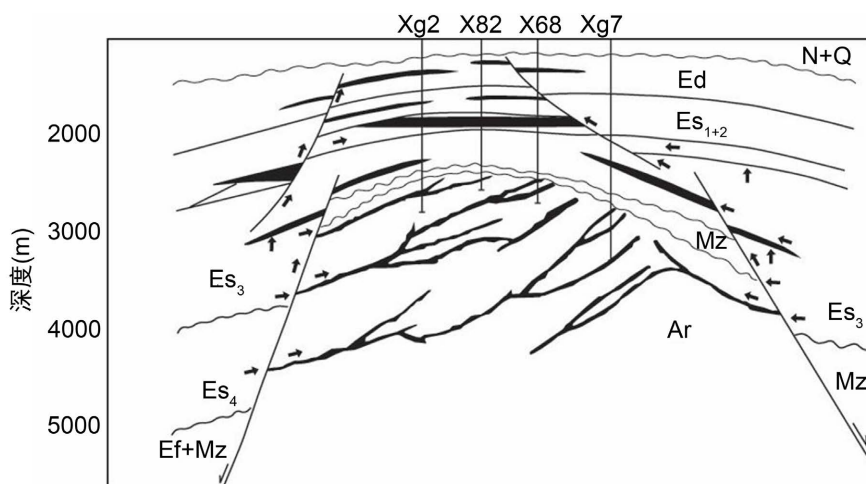


Figure 5. Reservoir forming model map of Xinglongtai buried hill

图 5. 兴隆台潜山成藏模式图

两侧或四周与生油岩直接接触，通过断层、裂缝和不整合面等输导体系，油气进入潜山，形成巨厚的潜山风化壳油藏和潜山内幕油藏如兴隆台潜山，曹台潜山，东胜堡潜山等；② 单向供油模式，一侧为深大断

裂与烃源岩直接接触的供油模式。如边台、赵家、茨榆坨、齐家等潜山(图 4(b)); ③ 顶部灌入式, 多为变质岩潜山顶面局部或大部呈天窗式与生油岩直接接触, 油气靠上覆地层静压灌入潜山而成藏, 如大民屯凹陷“负向构造”油藏; ④ 混合式成藏模式, 上述③ + ①或③ + ②等两种供油方式同时存在的混合成藏模式。

4. 中国东部裂谷盆地变质基底中的油气前景展望

中国东部裂谷盆地, 主要指渤海湾盆地和苏北-南黄海盆地。对称分布于郯庐断裂的两侧。分别属于华北板块和下扬子板块(图 1(a))。其基底变质岩都不同程度地经历过多期次强烈的构造断裂活动; 特别是中生代以来, 郯庐断裂强烈的走滑扭动和拉伸张裂等应力作用的影响和改造, 形成多套裂缝系统和受深大断裂控制的凹凸相间的构造格局。因此都不同程度具有变质岩潜山成藏体系有效耦合的基本地质条件, 有利于潜山内幕油藏形成。但由于所处构造位置不同、构造断裂活动强度的影响和改造作用的差异, 基底变质岩潜山的结构、埋深和勘探效果差异较大。下面仅以两个盆地变质基底埋深和基底变质岩古潜山油藏勘探现状作简要分析和展望。

4.1. 渤海湾盆地

4.1.1. 油气资源充足

研究认为[9], 渤海湾盆地仅探明石油总资源量的 40.1%左右, 尚有约 60%的待探资源量; 此外, 还有 20 多个勘探程度较低或没有进行勘探的凹陷, 可能有较大的资源潜力待探; 因此随着勘探技术进步和思创新, 再探明总资源量的 20%~30% (达到 60%~70%的盆地资源探明率), 其中, 基底变质岩是重要的勘探领域。因此实现大幅增加石油储量、产量是有丰富的资源基础的。

4.1.2. 渤海湾裂谷盆地变质基底潜山勘探目标选择

据潜山结构、基底变质岩潜山埋深和勘探现状, 分为东部和西部地区。近期可选择在凹边或凹中的凸(隆)起、潜山、已发现的变质岩潜山风化壳油藏, 在成藏体系评价基础上选择性加深钻探。

1) 渤海湾裂谷盆地东部地区

包括辽河、辽东湾、渤中和济阳等坳陷。资料表明, 本区的高、低凸起和低位潜山, 大多为受断层控制的太古界变质岩潜山(图 1(c))或有较薄的中生界 + 太古界变质岩结构型潜山(图 2(a)), 而且, 多为地垒状潜山, 第三系生油岩系直接包超或披覆在潜山上。构成有效耦合的成藏体系。潜山顶面埋深约 1200~3800 m。是最有利的变质岩潜山内幕油藏勘探区。

近期, 可对已知的变质岩潜山风化壳油藏, 在成藏体系综合评价基础上选择性加深勘探, 如 JZ25-1S、PL-1、BZ19-6、石臼坨凸起、沙坨田凸起、埕北低凸起和东营凹陷北部边缘的王庄、郑家、平方王等潜山风化壳油藏加深钻探达供油窗底界左右, 可望在变质岩潜山风化壳油藏之下找到兴隆台潜山式的巨厚的潜山内幕油藏。

2) 渤海湾裂谷盆地西部地区

包括黄骅坳陷、埕宁隆起、临清坳陷、沧县隆起-刑衡隆起、冀中坳陷等。在基底变质岩潜山上, 不同程度地覆盖有较厚的 Pt_{2-3} 、Pz、Mz 地层, 太古界变质基底埋藏较深, 凹陷中一般大于 6000 m。但在凹边的凸起或潜山埋藏较浅[10]: 如位于饶阳凹陷东侧的新河凸起上的晋古 19 井, 于 1015 m 进入变质岩潜山, 在 1017.2~1068 m 试油获 6.37 t/d; 河间潜山(Pt + Ar), 已探明数百万吨石油地质储量, 其中钻迂变质岩的 10 口井中, 有 3 口井在潜山内幕获不同程度的油气显示和低产油流。是本区变质岩潜山内幕油藏勘探的重要苗头和启示。

近期可选择已在变质岩潜山风化壳获工业油气流的潜山和凹边凸起, 如与河间潜山毗邻的留北、八里庄、南马庄等潜山; 大兴、牛坨镇、宁晋、新河等凸起。以变质岩潜山内幕油藏为主, 兼探中上元古界原生油藏和“新生古储”的潜山内幕油藏。

此外, 根据晋古 19 井、河间等变质岩潜山的资料推测, 献县凸起、沧县隆起、邢衡隆起、埕宁隆起等的变质岩潜山可能埋藏较浅, 并具有多套烃源岩通过断层向潜山供油的有利条件, 是潜山内幕油藏的重要靶区之一, 应加强勘探研究。

4.2. 苏北 - 南黄海盆地

处于下扬子板块东北部(图 1(a))。由于变质基底埋藏较深(>6000 m)、地震资料信噪比较低, 基底变质岩潜山面貌和分布不清。目前, 可选择具有有效耦合成藏体系的盆地或盆中有深大断层控制的凸起或隆起, 以基底变质岩潜山为目标, 兼探中生界灰岩潜山内幕油藏。加深勘探达变质岩潜山成藏体系有效耦合的深度(或供油窗底深), 争取有新的重大发现和突破。

5. 基底变质岩潜山油藏勘探技术

物探技术, 特别是地震勘探技术是沉积盆地中, 以寻找含油气圈闭的主要技术手段。但对于复杂地质条件, 如变质岩体内部裂缝的刻画及其含有物的检测等存在较大困难。因此, 应加强有关物探技术量子化的攻关研究, 探索利用石油微观粒子(量子)直接找油的新技术。力争在变质岩潜山圈闭、内幕裂缝系统的判识与刻画、流体检测等方面有重大突破; 科学有序引进、推广直接找油的“微轻子石油探测技术”。它是利用特殊仪器探测地下流体产生的“微轻子”集束(浓度), 经过大型计算机处理, 给出地下矿体的分布范围、埋藏深度和储量等参数[11]。因此它不受各种复杂地质条件影响, 是当前基底变质岩潜山内幕油藏勘探较科学、经济、简便、快捷而适用的有效方法。如与物探技术的有序结合可大大加快变质岩潜山内幕油藏勘探步伐。

6. 结论

1) 中国东部变质基底经历过多次强烈构造运动, 必然产生多套裂缝系统, 为巨厚潜山内幕油藏系统的形成提供了良好的储集空间;

2) 变质岩裂缝的发育程度, 受制于岩性、应力强度和方向、构造位置等。其储集性能遵循“优势岩性”序列规则。在同一地区, 位于序列前面的岩石依次优于靠后的岩石; 在不同地区的“优势岩性”序列不同;

3) 在裂谷盆地中, “源、储、输、盖”等, 是构成基底变质岩潜山成藏体系的四要素。它们的有效耦合程度、源岩的性质等影响和决定了潜山内幕油藏的形成、丰度和分布特点; 有效耦合的成藏体系埋藏有多深, 变质岩潜山内幕油藏的埋藏就可能有多深。这是坚定在变质岩潜山风化壳油藏之下寻找“内幕油藏”的理论依据;

4) 裂谷盆地中基底变质岩潜山内幕油藏分布, 具有复杂性、隐蔽性的特点。在纵向上有时会出现油、水层倒置或油水层交互发育(LH 赵家潜山), 或钻过几米、甚至数百米变质岩无油气显示或水层显示, 都不能否认该潜山内幕油藏的存在; 在平面上, 可能出现不规则的“团块”状、“星点”状或沿深大断裂作不规则分布等特点。都应在对有效耦合成藏体系的综合评价后决定取舍;

5) 科学有序引进、推广应用全新的石油勘探技术——“微轻子石油探测技术”, 是加快推进火山岩体、变质岩体内幕油气藏勘探的重要手段。

上述理论和认识, 丰富和发展了石油地质理论。使我们对裂谷盆地基底变质岩石油勘探认知, 从

偶然到必然、从被动到主动、从迷茫到清晰、从等待观望到主动出击的重大创新和思路转变。促进基底变质岩潜山油气勘探再上新台阶、石油工业发展再创新辉煌。

参考文献

- [1] 孟卫工, 李晓光, 刘宝鸿, 等. 辽河拗陷变质岩古潜山内幕油藏形成主控因素分析[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 584-589.
- [2] 张津宁, 付立新, 等. 渤海湾盆地黄骅拗陷古潜山宏观展布特征与演化过程[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 585-596.
- [3] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 64-89.
- [4] 刘寅, 陈清华, 胡凯, 等. 渤海湾盆地与苏北-南黄海盆地构造特征和成因对比[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(1): 38-51.
- [5] 薛永安, 项华, 李思田. 锦州 25-1S 大型混合花岗岩潜山油藏发现的启示[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(3): 29-31.
- [6] 刘兴周, 顾国忠, 等. 辽河拗陷太古界基底储层研究进展[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(6): 32-35.
- [7] 王昕, 周心怀, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 262-270.
- [8] 施和生, 王清斌, 等. 渤中拗陷深层渤中 19-6 构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.
- [9] 李春光. 试论渤海湾盆地油气富集规律与勘探[J]. 海相油气地质, 2006, 11(3): 4-14.
- [10] 李成海, 田建章, 等. 饶阳凹陷河间变质岩潜山内幕油气成藏模式与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 781-789.
- [11] 廖兴明. 油气勘探新技术: 微轻子(ML)油气探测技术[J]. 勘探家, 1999(3): 49-50.