



渤中凹陷北部古近系底部不整合发育特征及其与油气成藏关系

陈宇航, 张新涛, 余一欣, 杨帆, 柳永军, 张震, 戈道瑶, 杜琦睿

Development characteristics of the unconformity on the bottom Paleogene in the northern Bozhong Sag and its relationship with hydrocarbon accumulation

CHEN Yuhang, ZHANG Xintao, YU Yixin, YANG Fan, LIU Yongjun, ZHANG Zhen, GE Daoyao, and DU Qirui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022050301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

西湖凹陷Y构造花港组气藏特征及成藏主控因素

Characteristics of gas reservoir and controlling factors for gas accumulation in the Huagang Formation in Y Structure, Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 174

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈宇航, 张新涛, 余一欣, 等. 渤中凹陷北部古近系底部不整合发育特征及其与油气成藏关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 170-180.
CHEN Yuhang, ZHANG Xintao, YU Yixin, et al. Development characteristics of the unconformity on the bottom Paleogene in the northern Bozhong Sag and its relationship with hydrocarbon accumulation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 170-180.

渤中凹陷北部古近系底部不整合发育特征及其与油气成藏关系

陈宇航^{1,2,3}, 张新涛⁴, 余一欣^{1,2}, 杨帆^{1,2}, 柳永军⁵, 张震⁵, 戈道瑶^{1,2}, 杜琦睿^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018
4. 中国海洋石油有限公司勘探开发部, 北京 100010
5. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘要:不整合是油气输导体系中的重要组成部分,也是油气成藏的有利场所。以渤海湾盆地渤中凹陷北部为例,综合利用三维地震资料、钻测井资料和岩心薄片资料,对古近系底部不整合发育特征及其对油气成藏影响进行分析。结果表明,渤中凹陷北部古近系底部不整合包括5种接触类型和7种结构类型。不整合通道类型划分为双运移通道I型、单运移通道II₁型和II₂型以及封堵型III型,单运移通道II₁型是研究区主要的不整合油气成藏类型。运聚类型包括侧向型、圈闭+侧向型、垂向+侧向型和封堵型4种。不整合之上砂岩输导油气的能力与砂岩微观特征及裂缝倾角相关,半风化岩层对油气的输导储集能力受控于原始孔渗良好且不易形成风化黏土层的火山岩。

关键词:不整合;油气成藏;火山岩;渤海湾盆地;渤中凹陷北部

中图分类号:TE121.2, P736

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022050301

Development characteristics of the unconformity on the bottom Paleogene in the northern Bozhong Sag and its relationship with hydrocarbon accumulation

CHEN Yuhang^{1,2,3}, ZHANG Xintao⁴, YU Yixin^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, LIU Yongjun⁵, ZHANG Zhen⁵, GE Daoyao^{1,2}, DU Qirui^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China
4. Development and Production Department of CNOOC Ltd., Beijing 100010, China
5. CNOOC Tianjin Branch, Tianjin 300459, China

Abstract: Unconformity is an important part of hydrocarbon migration system and a favorable place for hydrocarbon accumulation. Taking the northern Bozhong Sag in Bohai Bay Basin as an example, we analyzed the characteristics of unconformity development on bottom Paleogene and its influence on hydrocarbon accumulation comprehensively by using the data from 3D seismic, drilling and logging, and core thin-section. Results show that there are five contact types and seven structural types of the Paleogene bottom unconformity in the northern Bozhong Sag. Unconformity channel types can be divided into double migration channel type I, single migration channel type II₁ and II₂ and plugging type III. The single migration channel type II₁ is the main type of unconformity hydrocarbon accumulation in the study area. The migration and accumulation types include lateral type, trap and lateral type, vertical and lateral type, and plugging type. The hydrocarbon migration capacity of sandstone above the unconformity is related to the microscopic characteristics of sandstone and the dip angle of fracture. The hydrocarbon migration and storage capacity of semi-weathered rock strata are controlled by the volcanic rocks with good original porosity and permeability and difficult to form weathered clay layer.

Key words: unconformity; hydrocarbon accumulation; volcanic rock; Bohai Bay Basin; northern Bozhong sag

资助项目:国家自然科学基金项目“东海陆架盆地西湖凹陷反转构造差异变形及其油气成藏效应”(42072149)

作者简介:陈宇航(1996—),男,硕士研究生,从事油区构造解析研究, E-mail: chen_yuhang1022@126.com

通讯作者:余一欣(1977—),男,博士,副教授,主要从事含油气盆地构造地质学教学和科研工作, E-mail: yuxin0707@163.com

收稿日期:2022-05-03; 改回日期:2022-05-19. 周立君编辑

不整合是区域性构造运动的产物,对构造演化的认识^[1]和油气的运聚与成藏都有重要意义^[2-5]。出于不同的研究角度以及研究手段,前人从地层产状^[6]、地震反射特征^[7-8]、成因机制^[9]、沉积间断特征^[10-11]、构造应力特征^[12]和油气成藏特征^[13]等多个方面对不整合类型进行了划分。基于野外观测^[14]、钻井岩心^[5]、测井资料^[15-17]等研究方法,将不整合的空间结构划分为 3 层,即上覆岩层、风化黏土层和半风化岩层。由于风化黏土层易受古地貌、母岩岩性、剥蚀强度等因素影响而难以保存,使不整合变为两层结构^[18],因此,不整合的空间结构在不同地区存在差异。

不整合作为油气储集单元和运移体系中重要的组成部分,在油气成藏和油气运输过程中起到至关重要的作用^[19-20]。国内外已发现众多与不整合相关的油气藏,明确了不整合的空间结构对油气勘探的重要指导意义^[5]。潜山是渤海海域目前重要的油气勘探方向,并先后发现了渤中 19-6、渤中 13-2 等多个大中型潜山油气田,环渤中凹陷潜山带已成为油气勘探的重点目标区。不整合作为潜山结构的主要组成部分^[21],是潜山油气成藏过程中重要的油气输导通道和储集单元,对不整合类型和空间结构的系统认识有助于潜山油气勘探工作。渤中凹陷

北部发育多个前古近系潜山构造,古近系底部不整合作为潜山地层与新生界之间发育的区域性不整合界面,对潜山油气运移与成藏具有重要意义。本文主要利用三维地震资料、钻测井资料以及岩心薄片资料,对渤中凹陷北部古近系底部不整合的类型和空间结构进行系统分析,旨在为该地区的油气勘探提供科学依据。

1 区域地质概况

渤海湾盆地是发育于新生代的裂陷盆地,盆地基底经历中生代印支运动和燕山运动的挤压-剥蚀-伸展-挤压-剥蚀的改造作用后,在新生代古近纪进入盆地的裂陷期。古近系作为盆地裂陷期的主要沉积地层,其底部不整合是渤海湾盆地重要的地质界面。由于盆地基底历经多期的构造改造作用,使得古近系底部出露多个时期的地层,导致古近系底部不整合结构相对复杂。

渤中凹陷北部潜山带位于渤海湾盆地海域辽西凸起南倾没端,东西两侧受限于渤中凹陷和秦南凹陷,北部与辽西凸起相连,南部与石臼坨凸起衔接(图 1)。研究区前古近系基底以太古界,下古生

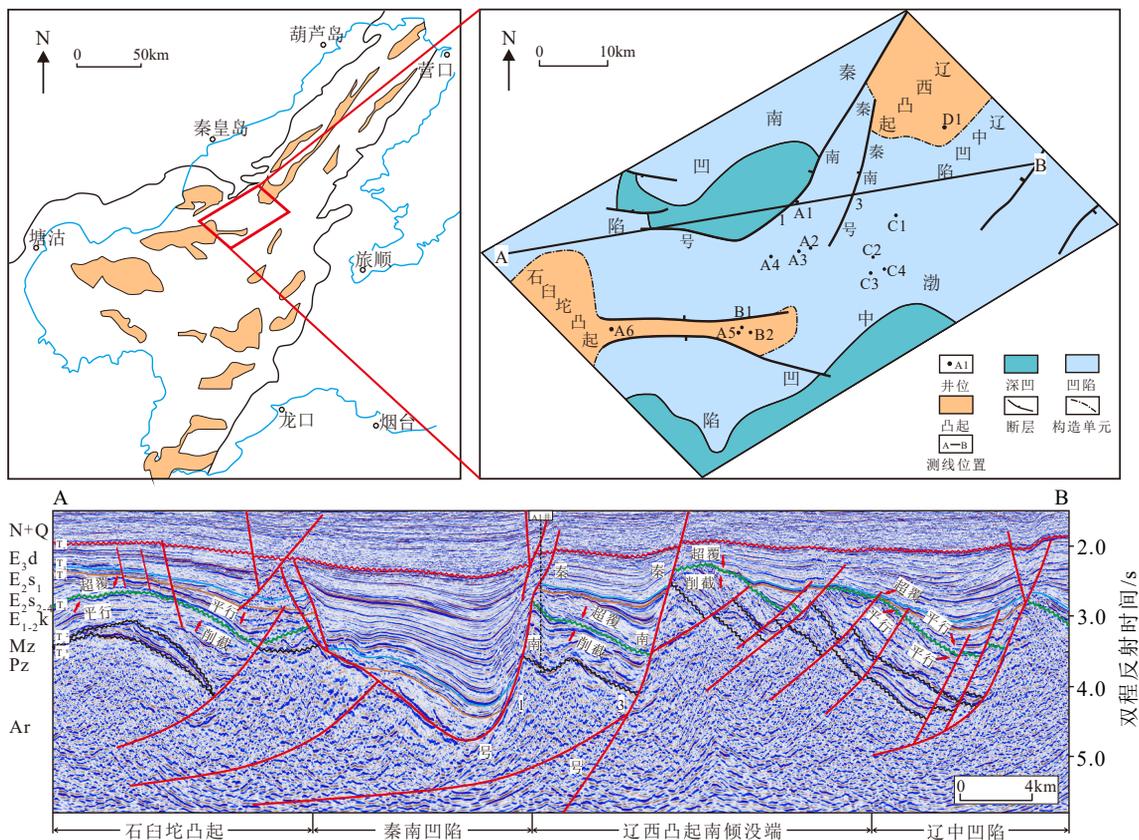


图 1 渤中凹陷北部位置及地震剖面图

Fig.1 Location and seismic profile of the northern Bozhong Sag

界寒武系、奥陶系,上古生界石炭系、二叠系以及中生界侏罗系和白垩系为主,其中古生界奥陶系和二叠系在古近系底部局部出露;基底之上发育古近系孔店组、沙河街组、东营组、新近系和第四系(图2)。

渤中凹陷北部地区生储盖条件良好,东营组和沙河街组是研究区主要的生烃层位,广泛分布在渤中凹陷和秦南凹陷中,并已达到生烃门限^[22];古近系河湖相的碎屑岩和前古近系经构造作用改造的火山岩、碳酸盐岩和变质岩基底,共同作为研究区内的油气储层;新近纪拗陷期和古近纪裂陷期的泥岩在研究区内展布稳定,是良好的油气盖层(图2)。

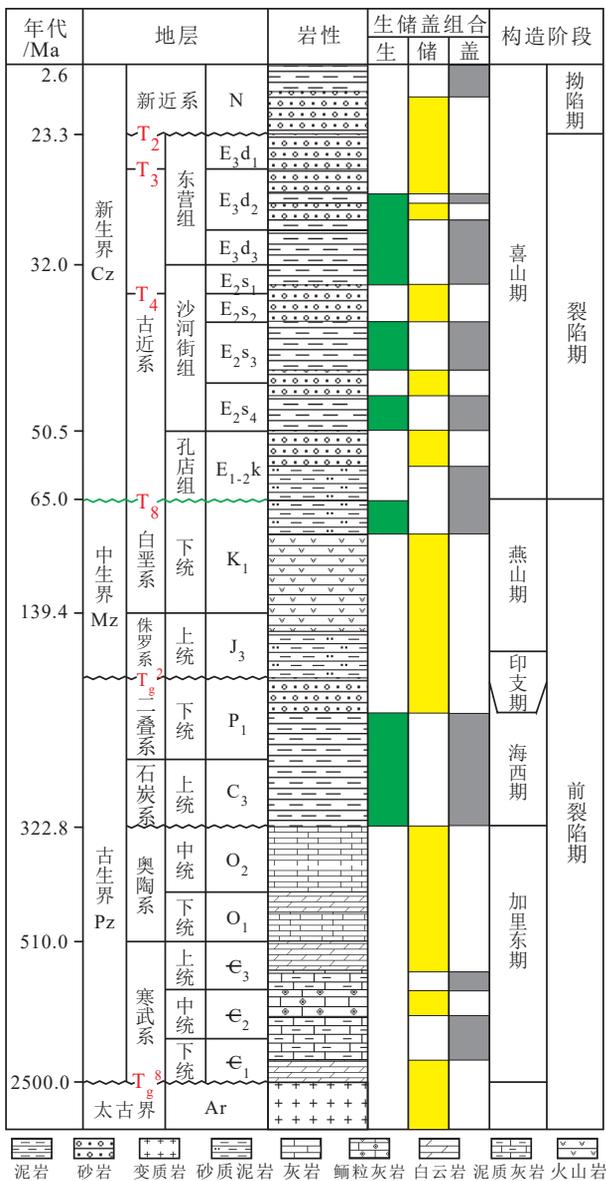


图2 渤中凹陷北部地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic histogram in the northern Bozhong Sag

2 不整合类型与结构分类

2.1 不整合类型

前人有多种划分不整合的方案,高长海等(2013)基于前人的研究成果,结合成因机制、不整合上下地层的地震反射特征和油气圈闭特征,将不整合划分为平行-褶皱型、平行-削截型、平行-平行型、超覆-褶皱型、超覆-削截型和超覆-平行型6种类型^[13]。据此本文结合三维地震资料解释,在研究区内识别出5种不整合类型,包括凸起区的平行-褶皱型和平行-削截型、陡坡带的超覆-削截型、缓坡带的超覆-平行型及断控缓坡带—凹陷区的平行-平行型(图3)。从不整合类型的分布规律可以看出,地形地貌对不整合类型的分布起主要控制作用。

平行-褶皱型主要分布于辽西凸起南段主体部位。辽西凸起南段在燕山末期至喜山期,经受挤压、剥蚀、整体下降3个构造演化阶段,前古近系基底保留残存褶皱形态,同时上覆古近系东营组沉积时期也未遭受强烈的挤压作用,整体呈平行式稳定沉积于中生界残存褶皱之上。

平行-削截型主要分布于石臼坨凸起北部与秦南凹陷之间(图1)。地震剖面上,界面之上同相轴与不整合面平行,界面之下同相轴与界面斜交。研究区中,该类不整合类型多发育在负反转断裂上盘,燕山晚期的挤压作用导致断裂上盘中生界遭受削截,古近纪裂陷阶段伸展作用使断裂反转接受新生界沉积,在靠近断裂部位形成平行-削截型不整合。

超覆-削截型主要发育在凸起顶端向缓坡带转折的部位,临近凸起顶部,削截角度较大,临近缓坡凹陷带,削截角度较小,是平行-削截型向平行-平行型的过渡类型。受燕山中期和喜山裂陷期伸展作用的影响,断块翘倾形成的单斜遭受剥蚀,在后期接受稳定沉积后,形成超覆-削截型不整合。超覆-削截型不整合主要分布在凸起部位和陡坡带。

平行-平行型主要分布在受断裂控制的缓坡带及凹陷内部,界面上下同相轴均与不整合面呈平行样式。此不整合是燕山末期遭受挤压隆升剥蚀之后,受裂陷期控沉积断裂的影响,使基底发生与断裂倾向相向的掀斜作用,同时上覆古近系形成半地堑,在半地堑底部近断裂位置形成平行-平行型不整合。该类不整合是油气从生烃凹陷向凸起圈闭中运移的重要通道。

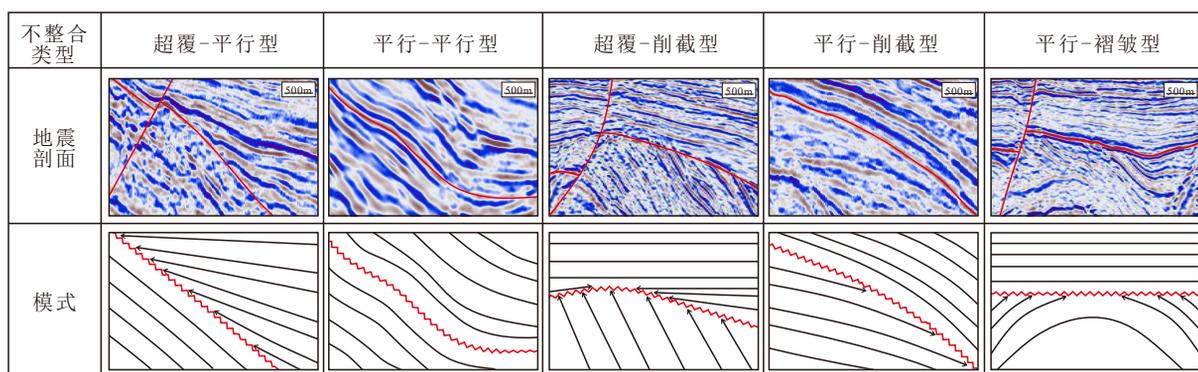


图 3 渤中凹陷北部古近系底部不整合类型特征

Fig.3 Characteristics of unconformity types at bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

超覆-平行型主要发育在不受断裂控制的缓坡带和受断裂控制的缓坡带向陡坡带的过渡区域,以渤中凹陷向辽西凸起南倾没端和辽中凹陷向辽西凸起的过渡区域最为典型,是平行-平行型向超覆-削截型的过渡类型。地震剖面上体现为不整合界面与下部同相轴平行,与上部同相轴斜交。此类不整合是油气从生烃凹陷向凸起带运移的重要路径。

2.2 不整合空间结构

不整合的类型是形成不整合油气藏的基础,不整合与油气的关系不仅与不整合的类型相关,而且受不整合的空间结构控制^[5]。不整合的空间结构对于油气具有双重作用,既能输导储集,又能封堵赋存^[23]。不整合空间结构受不整合面之上的岩层、风化黏土层及半风化岩层共同控制。

不整合面之上的岩层定义为依附于该不整合面发育的岩层^[24]。研究区内不整合面之上的岩层以古近系河湖相的砂砾岩、泥岩为主。砂砾岩主要发育在沙河街组和东营组,分选磨圆中等,灰质砂岩中含有生物介壳,粒间孔隙与溶蚀孔隙发育,孔渗性良好,但分布较为局限,是研究区内良好的油气运移通道和储集单元。泥岩发育层位较多,孔店组、沙河街组下部和东营组下部均发育大套泥岩,分布范围广,是区域内稳定的油气盖层,其中沙河街组与东营组也是古近系主要的生油层。测井曲线上,砂砾岩表现为低自然伽马值,高声波时差,深、浅电阻率之间具有较明显的幅度差;泥岩表现为高自然伽马值,低声波时差,高自然电位,深、浅电阻率之间基本无幅度差(图 4)。

半风化岩层以中生界的火山岩、上古生界的砂岩和下古生界的碳酸盐岩为主。中生界火山岩以义县组中酸性的流纹质火山角砾岩、安山岩和玄武岩等为主,分布广泛,局部发育中生界孙家湾组泥

岩;上古生界以云质细砂岩为主,研究区内主要分布在石臼坨凸起缺失中生界的东倾没端;下古生界以奥陶系的石灰岩为主,主要分布在辽西凸起南段下古生界暴露区。由于研究区内古近系底面出露的岩性多样,导致半风化岩层测井曲线特征复杂(图 4)。

半风化岩层遭受物理、化学和生物风化作用形成风化黏土层,风化黏土层的发育程度和分布范围受母岩岩性、暴露时间及古地形等多种因素影响^[24],在空间上的展布特征存在差异,凸起上较薄或缺失,斜坡带-凹陷区域发育稳定^[18]。前人研究表明,风化黏土层的缺失总体分为两种情况,一种是不整合面作为沉积间断面,母岩暴露风化时间较短,未形成风化黏土层;另一种是风化黏土层形成之后遭受剥蚀而缺失,该种类型的风化黏土层缺失一般会在下伏半风化岩层的顶部存在泥质充填的富集区域^[25]。结合研究区岩心薄片特征以及前人研究成果^[17,26-27],在测井曲线上,风化黏土层相对于母岩或半风化岩层表现为中低电阻率、高声波时差、高自然伽马值以及低于正常泥岩的自然电位(图 4)。

2.3 不整合空间结构分类

根据录井岩性资料、测井资料和薄片资料及有无风化黏土层将研究区古近系底部不整合划分为 2 大类 7 小类,分别是缺失风化黏土层的砂(不整合面之上的砂砾岩)-火(不整合面之下的火山岩)型、泥(不整合面之上的泥岩)-砂型和泥-火型不整合以及发育风化黏土层的砂-泥(风化黏土层)-火型、砂-泥-灰(不整合面之下的灰岩)型、泥-泥-泥(不整合面之下的泥岩)型和泥-泥-火型不整合。

砂-火型不整合之上为沙一段含砾细砂岩,下伏地层为白垩系义县组火山角砾岩,缺失风化黏土层,以 C3 井最为典型。不整合面之上的岩层以粒

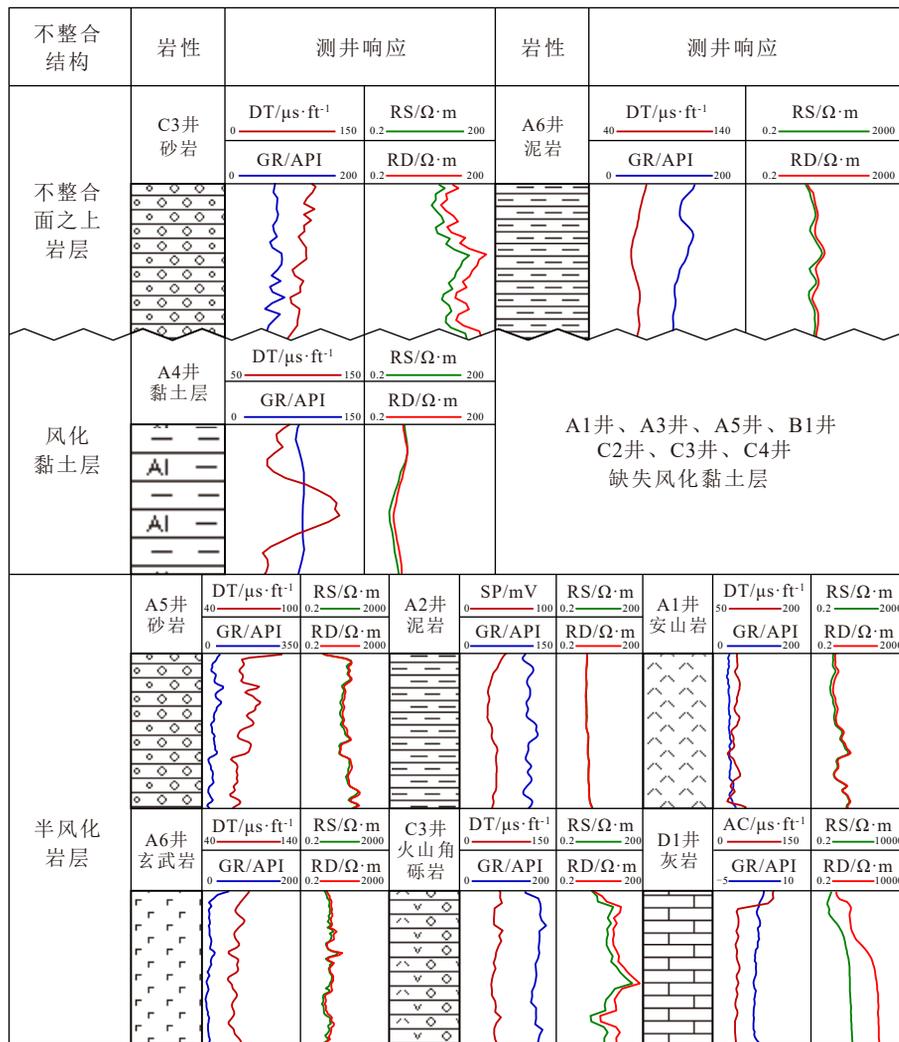


图4 渤中凹陷北部古近系底部不整合空间结构模式及测井响应特征

Fig.4 Spatial structure model and logging response characteristics of the unconformity at bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

间孔隙和溶蚀孔隙为主,含砾细砂岩上部为一套厚层泥岩;半风化岩层溶蚀孔隙、砾间孔隙和裂缝均发育,不整合上下岩层均有油气显示(图5a)。

泥-火型不整合之上为东三段厚层泥岩,半风化岩层为中生界安山岩,缺失风化黏土层。由于研究区内中生界火山岩分布广泛,且东营组基本上覆盖全区,A1井和A3井古近系底部不整合均为该种类型(图5b),A1井半风化岩层见油气显示。

泥-砂型不整合之上为东二下段的大套泥岩,夹薄层泥质粉砂岩;半风化岩层为上古生界白云质细砂岩,缺失风化黏土层。该类型以A5井为典型代表,主要分布在上古生界碎屑岩暴露的区域(图5c),半风化岩层见油气显示。

砂-泥-火型不整合之上为沙三中段碎屑岩,紧邻风化黏土层的是厚约1m的砂岩,上覆大套泥岩;风化黏土层厚3m,测井曲线上表现为自然伽马

和声波时差明显变大,深、浅电阻率增大;半风化岩层为中生界九佛堂组的安山岩,不整合上下均无油气显示,以A4井为代表(图5d)。

砂-泥-灰型不整合之上为东二下段的砂砾岩,半风化岩层为奥陶系石灰岩,发育3m厚的风化黏土层,不整合上下均有油气显示。该类型主要分布在辽西凸起南段下古生界暴露区域,仅在D1井可见(图5e)。

泥-泥-泥型不整合之上为孔店组的砂泥岩,泥岩与不整合面接触;半风化岩层为中生界孙家湾组泥岩,发育5m厚的风化黏土层,测井曲线表现为较正常泥岩低的自然伽马、中低电阻率,自然电位由高变低,A2井为该类型井(图5f)。

泥-泥-火型不整合之上为沙河街组泥岩,半风化岩层为中生界玄武岩,风化黏土层厚7m,测井曲线表现为较高的自然伽马值、高声波时差和深、浅

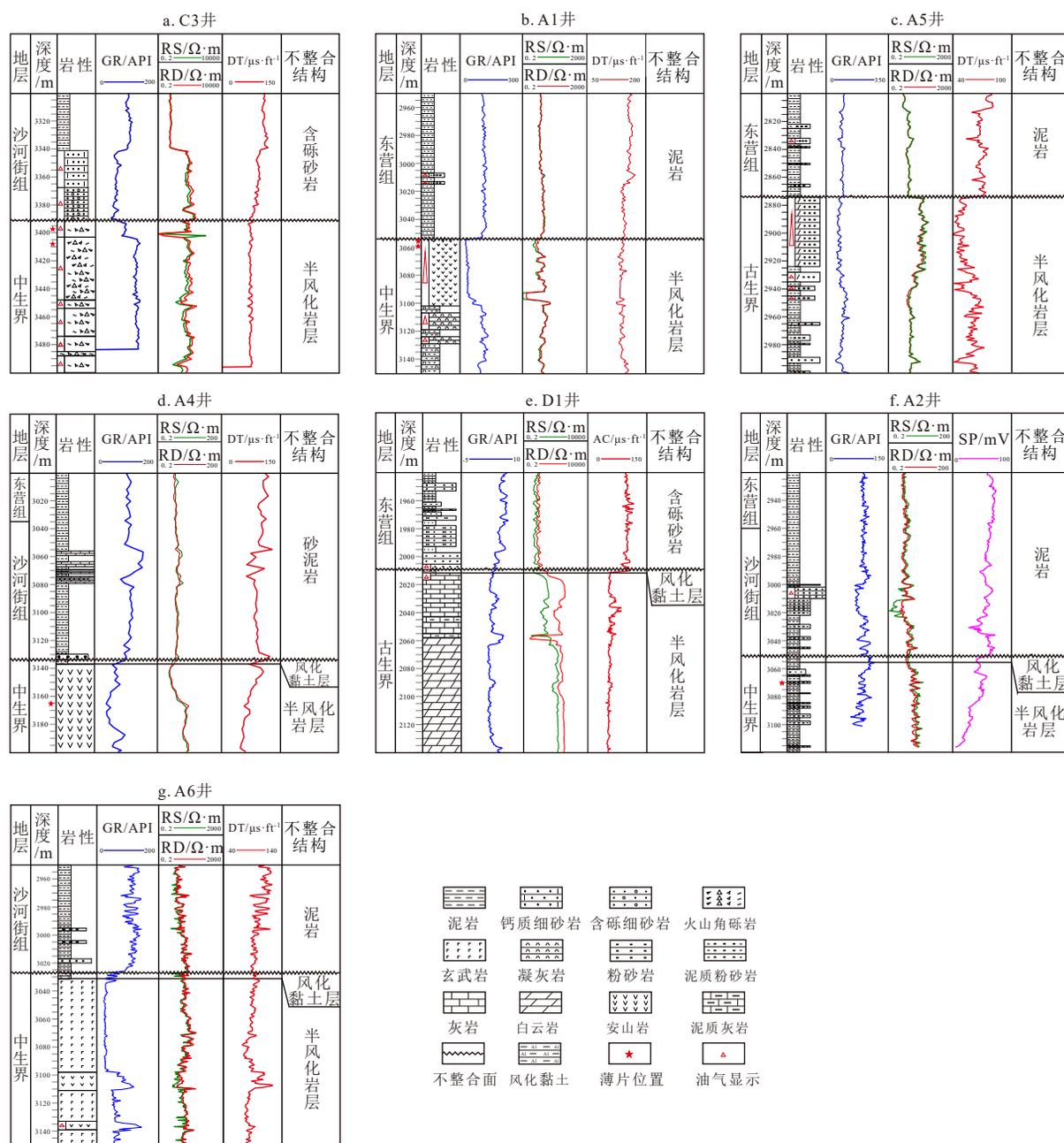


图 5 渤中凹陷北部典型井古近系底部不整合空间结构特征

Fig.5 Characteristics of unconformity spatial structure revealed in typical wells on bottom Paleogene of the northern Bozhong Sag

电阻率变低,以 A6 井为代表(图 5g),半风化岩层未见油气显示。

3 不整合与油气成藏的关系

风化黏土层对油气具有稳定的封堵作用,不整合面之上的岩层与半风化岩层的岩性和物性决定了不整合结构对油气的实际作用。当不整合上下的岩层孔渗较好时,不整合是优质的油气运移通道和储集单元;当不整合上下为孔渗差的岩层时,不整合结构对油气以封堵作用为主。不整合上下地

层的油气显示是不整合运移油气最直接的证明,根据不整合空间结构类型及不整合上下岩层的含油性对研究区典型井进行统计分析,结果显示不整合空间结构与不整合上下岩层的含油性具有密切联系(表 1)。

依据表 1 的统计结果,将研究区内不整合结构对油气的输导通道类型划分为双运移通道型(I型)、单运移通道型(II型)及封堵型(III型)3 种类型,其中单运移通道型可细分为不整合完全起输导储集作用的 II₁ 型和不整合上层封堵下层输导储集的 II₂ 型两个亚类(图 6)。

表1 渤中凹陷北部古近系底部不整合油气显示统计
Table 1 Oil and gas display in the unconformity at the bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

不整合结构	井号	含油性	
		不整合之上	半风化岩层
缺失风化黏土层	砂-火型	C2、C3、C4	油层 油层
	泥-火型	A1	不含油 气层
		A3	不含油 不含油
	泥-砂型	A5、B1	不含油 油层
发育风化黏土层	砂-泥-火型	A4	不含油 不含油
	砂-泥-灰型	D1	油斑 油斑
	泥-泥-泥型	A2、B2	不含油 不含油
	泥-泥-火型	A6、C1	不含油 不含油

根据研究区古近系底部不整合类型及通道类型, 将不整合运聚类型细分为侧向型、圈闭+侧向型、侧向+垂向型和封堵型4种(图7)。侧向型代表油气可以通过不整合进行侧向运输, 全区所有I型和II型不整合对油气均有侧向输导的作用, 凹陷中平行-平行型不整合仅具有侧向输导能力; 圈闭+侧向型表示油气既可以通过不整合进行侧向运输, 又能形成不整合圈闭, 风化黏土层和上覆泥岩等物性

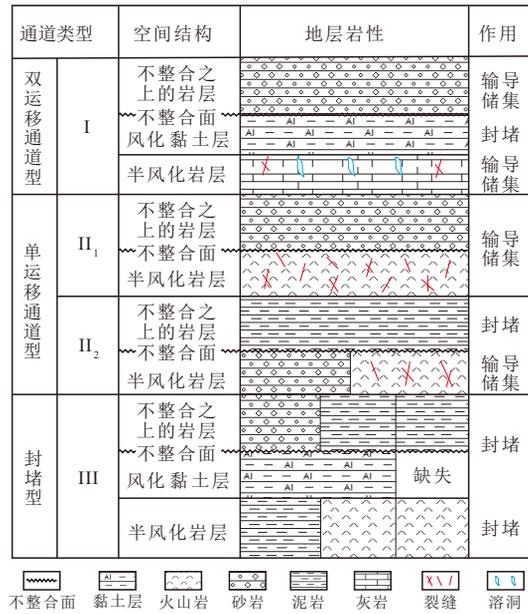


图6 渤中凹陷北部古近系底部不整合运移通道类型
Fig.6 Unconformity migration channel type at the bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

较差的岩层作为有效圈闭的盖层, 主要分布在凸起区和斜坡带; 侧向+垂向型表示油气既可以侧向运输又可以垂向运输, 在断层遮挡的条件下可形成有效油气藏; 封堵型对油气无输导能力。

双运移通道I型为砂-泥-灰结构, 主要分布在

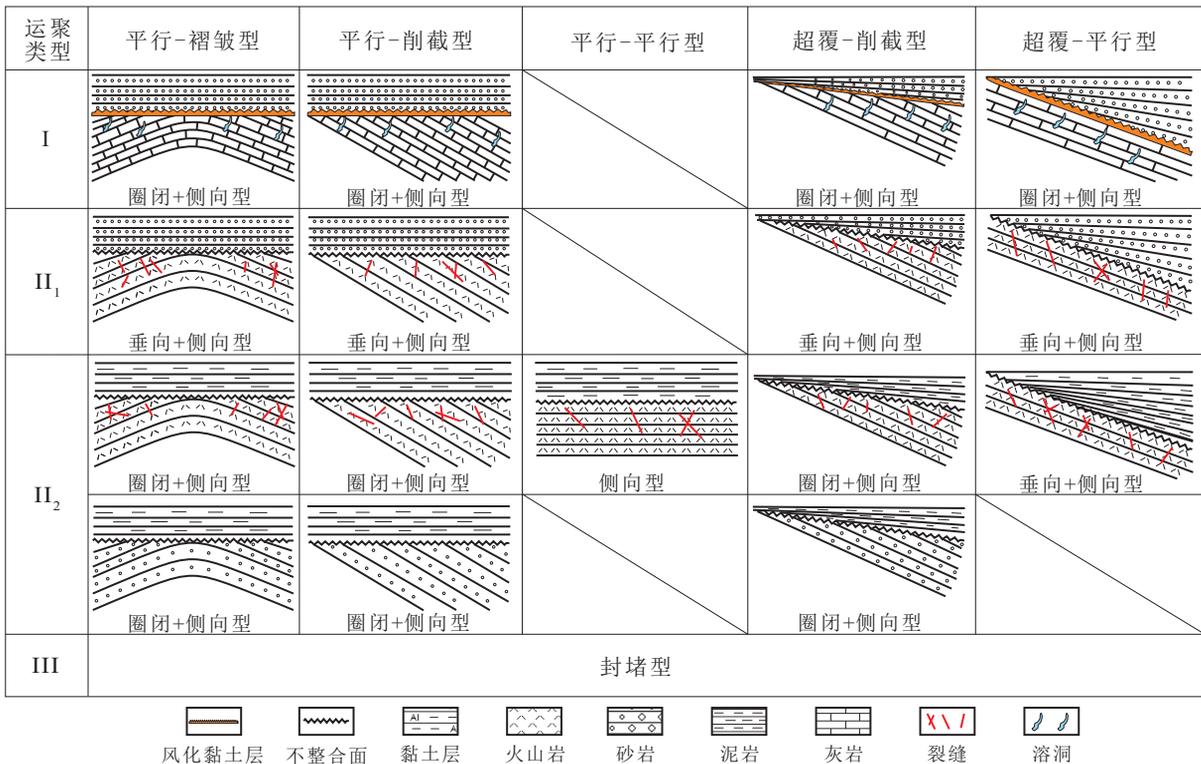


图7 渤中凹陷北部古近系底部不整合运聚类型
Fig.7 Unconformity migration-accumulation type at the bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

下古生界出露区, 风化黏土层作为封堵层, 将上下岩层分为两个相对独立的输导储集单元, 不整合上下岩层中均有油气显示。II₁ 型为砂-火型结构, 缺乏风化黏土层, 不整合面上下岩层均为孔渗良好的岩层, 整体作为单一的油气输导储集单元, 在断层遮挡条件下可形成油气藏, 研究区中 C3 井最为典型(图 8a); II₂ 型包括泥-砂型和泥-火型两种结构, 半风化岩层对油气起输导储集作用, 不整合之上的泥岩地层起封堵作用, 泥-砂型分布在上古生界出露区, 以 B1 井为例, 不整合之上为东营组泥岩, 在不整合之下的上古生界砂岩中形成油气藏(图 8b)。III 型包括砂-泥-火型、泥-泥-泥型、泥-泥-火型和泥-火型 4 种, 不整合上下岩层均无油气显示, 对油气起封堵作用。

4 不整合输导性与上下岩层关系

4.1 不整合之上岩层特征

研究区不整合之上以砂岩和泥岩为主, 泥岩在不整合结构中起封堵作用为主, 砂岩既可作为输导层(I 型和 II₁ 型), 又能充当封堵层(III 型), 砂岩的物性条件决定了对油气的作用。以 II₁ 型不整合结构的 3 口井为例, 不整合之上砂岩镜下特征表现为

中等分选, 磨圆度介于次圆与次棱, 颗粒支撑, 点线接触为主, 粒间孔隙和溶蚀孔隙发育, 发育微裂缝(图 9)。可以观察到, C2 井砂岩主要以粒间孔和溶蚀孔为主, C3 井以粒间孔隙为主, C4 井以溶蚀孔隙为主, 均具有较为良好的孔隙结构。

C2 井和 C3 井砂岩段孔隙度和渗透率测试结果显示, 目的层段砂岩样品的孔隙度为 5.3%~32.4%, 渗透率为 $(0.027\sim397.8)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$, 结合钻井油气显示, 当孔隙度 $< 10\%$ 、渗透率 $< 0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时, 难以形成油层, 但有油气显示, 且 C2、C3、C4、D1 井相对于 A4 井声波时差数值较小, 表明 A4 井砂岩段孔隙度特征对油气输导的影响较小, 裂缝有效性可能是影响 A4 井砂岩段油气输导的原因。

裂缝倾角是影响裂缝有效性的重要因素之一, 深、浅电阻率的比值能够反映裂缝倾角特征, 一般认为, 低角度裂缝是油气成藏中的无效缝。统计研究区 5 口不整合之上砂岩段深、浅电阻率比值, 结果显示不整合之上砂岩具油气显示的 D1 井、C2 井、C3 井和 C4 井砂岩层多以高角度裂缝为主($RD/RS > 1$), 无油气显示的 A4 井砂岩段主要发育低角度裂缝($RD/RS < 1$)(图 10), 表明裂缝倾角或裂缝的有效性对不整合之上砂岩层的油气输导起重要作用。

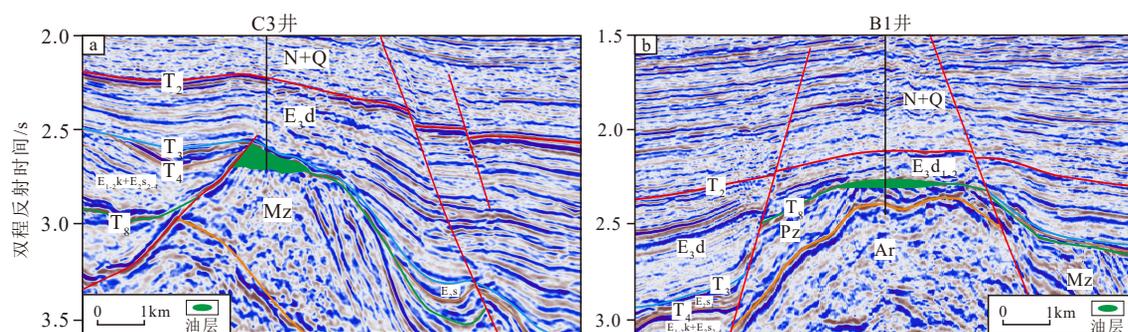
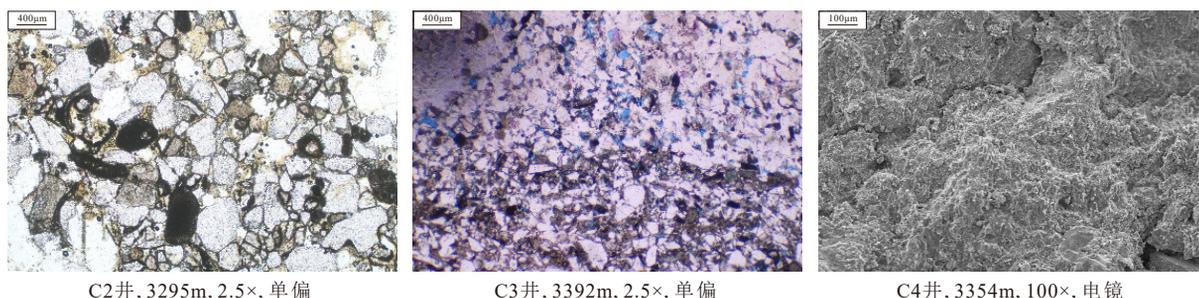


图 8 渤中凹陷北部古近系底部典型不整合油藏剖面

Fig.8 Typical profiles of the unconformity reservoirs at the bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag



C2井, 3295m, 2.5×, 单偏

C3井, 3392m, 2.5×, 单偏

C4井, 3354m, 100×, 电镜

图 9 渤中凹陷北部古近系底部不整合之上砂岩薄片特征

Fig.9 Thin section characteristics of sandstone overlain the unconformity at the bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

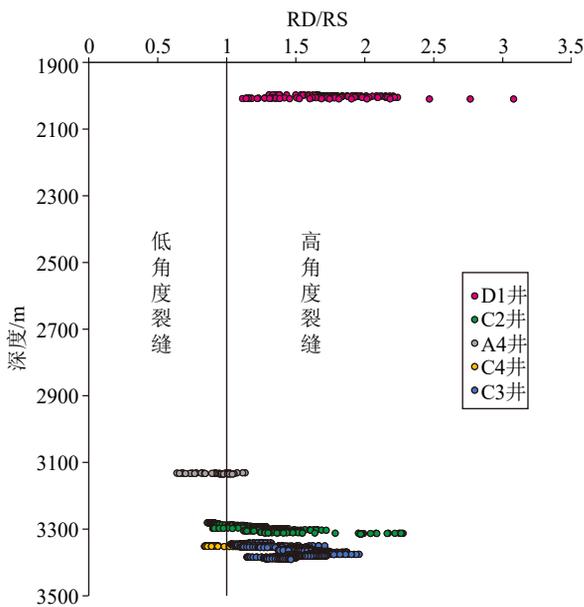


图 10 渤中凹陷北部古近系底部不整合之上砂岩裂缝倾角特征

Fig.10 Characteristics of dip angle of fracture in the sandstone overlain the unconformity at bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

4.2 半风化岩层特征

半风化岩层作为不整合结构中遭受风化剥蚀的主体,是不整合输导储集油气的主要结构单元。研究区半风化岩层岩性多样,包括泥岩、砂岩、火

山岩和碳酸盐岩,除泥岩外,砂岩与碳酸盐岩见油气显示,火山岩部分见油气显示。火山岩作为研究区半风化岩层的主要类型,其物性特征决定了研究区古近系底部不整合与油气成藏关系。

通过岩心薄片资料发现,半风化岩层存在明显的泥质渗滤充填现象。C3井缺失风化黏土层,半风化岩层的流纹质火山角砾岩以角砾结构为主,火山角砾占约80%,被后期的长英质胶结物充填(图11a),发育微裂缝;碱长粗面岩中石英斑晶明显,裂缝孔隙均未遭受充填(图11b)。A4井与A2井发育风化黏土层,A4井半风化岩层安山岩受泥质充填明显(图11c),A2井半风化岩层为粉砂质泥岩(图11d)。A1井缺失风化黏土层,不整合面处安山岩孔隙部分遭受泥质充填(图11e),不整合面以下3m处泥质充填不明显,孔隙发育(图11f),且其上覆岩层为泥岩,推测A1井半风化岩层的泥质充填主要受上覆泥岩地层影响。

研究区内火山岩具有岩性变化快、非均质性强的特点^[28],同时火山岩半风化岩层物性及其原始孔隙度和渗透率均与岩性相关^[26,28],偏基性火山岩更易形成风化黏土层,导致其表面风化孔隙及原生孔隙遭受充填^[26]。研究区A2、A3、A4、C2和C3井火山岩物性测试数据显示^[28],火山角砾岩孔渗性最好,安山岩与流纹岩次之,玄武岩较差,凝灰岩最差(图12)。该特征与半风化岩层含油关系对应良好,

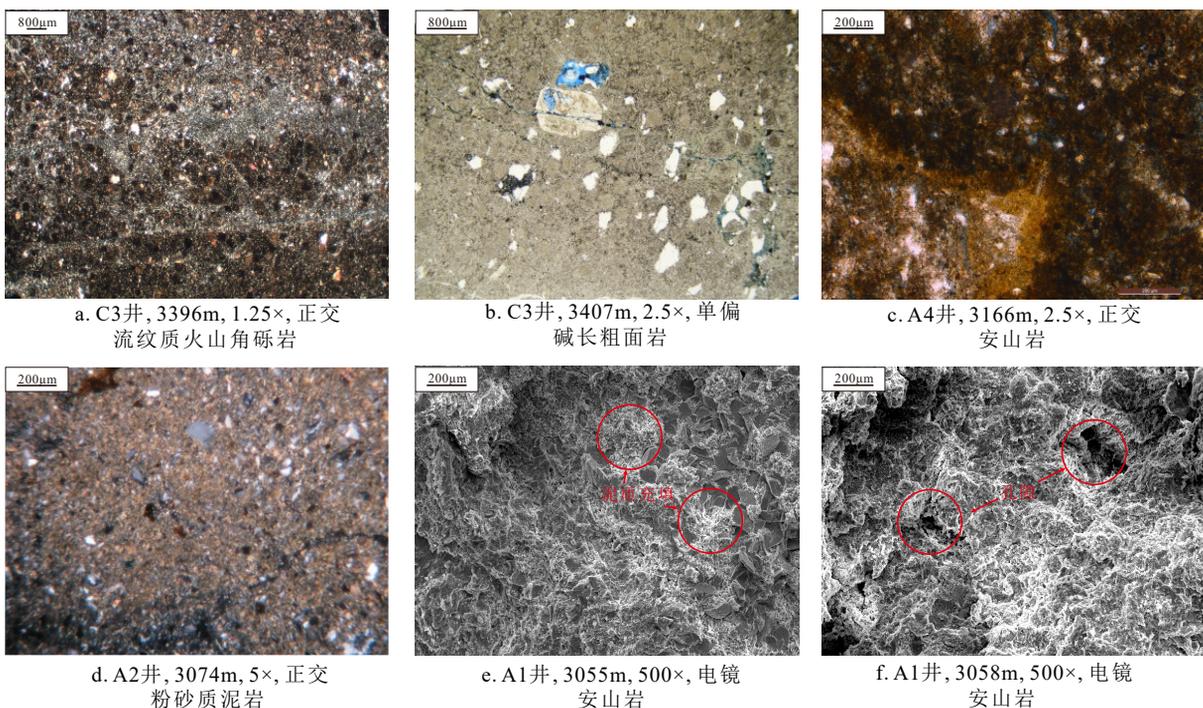


图 11 渤中凹陷北部古近系底部半风化岩层薄片特征

Fig.11 Thin section characteristics of semi-weathered strata at the bottom of the Paleogene in the northern Bozhong Sag

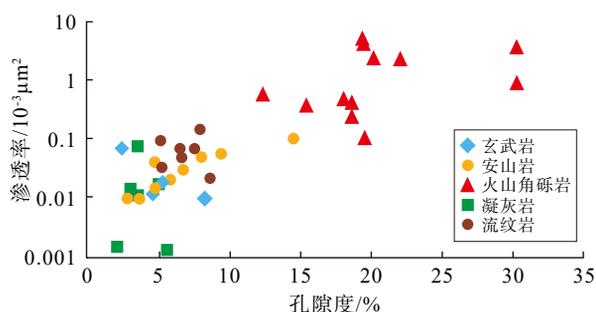


图 12 渤中凹陷北部火山岩岩性与孔渗关系分布图^[28]

Fig.12 Relationship between lithology and porosity and permeability of volcanic rocks in the northern Bozhong Sag

C2、C3、C4 井半风化岩层均为火山角砾岩, 油气丰富; 安山岩半风化岩层含油气; 玄武岩半风化岩层未见油气。

风化黏土层对半风化岩层物性影响显著, 以 A1 井和 A4 井为例(图 5), A1 井缺失风化黏土层, 半风化岩层为安山岩, 镜下孔隙部分被上覆泥质充填(图 11e), 有油气显示; A4 井发育风化黏土层, 半风化岩层为安山岩, 无油气显示。

综上所述, 火山岩岩性控制了半风化岩层原始孔渗特征以及风化黏土层的发育程度, 孔渗良好且不易发育风化黏土层的火山岩是优质的油气输导储集单元, 对研究区半风化岩层火山岩岩性展布特征进行精细刻画是寻找古近系底部不整合相关油气的重要工作。

5 结论

(1) 渤中凹陷北部古近系底部不整合类型有平行-褶皱型、平行-削截型、平行-平行型、超覆-削截型和超覆-平行型。平行-平行型主要分布在断裂控制的缓坡带和凹陷中; 超覆-平行型分布在渤中凹陷向辽西凸起过渡的缓坡带; 超覆-削截型分布在凹陷向凸起过渡的陡坡带; 平行-削截型和平行-褶皱型均分布在凸起顶部。不整合空间结构以是否发育风化黏土层分为 2 大类 7 小类, 分别是砂-火型、泥-火型、泥-砂型、砂-泥-火型、砂-泥-灰型、砂-泥-泥型及泥-泥-火型。

(2) 渤中凹陷北部古近系底部不整合划分为 3 种通道类型, 分别为双运移通道 I 型、单运移通道 II₁ 型和 II₂ 型、封堵型 III 型。结合不整合类型及通道类型, 将不整合运聚类型分为侧向型、侧向+圈闭型、侧向+垂向型和封堵型 4 种, 其中以侧向型为主。

(3) 研究区不整合之上的岩层与半风化岩层的物性共同控制不整合与油气成藏关系。不整合之

上物性良好、高角度有效裂缝发育的砂岩是有利的输导储集单元; 半风化岩层的输导和储集能力受火山角砾岩及偏酸性的原始孔渗良好且不易发育风化黏土层的火山岩控制。

参考文献 (References)

- [1] Rafini S, Mercier E. Forward modelling of foreland basins progressive unconformities [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 146 (1-2): 75-89.
- [2] Levorsen A I. The obscure and subtle trap [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50 (10): 2058-2067.
- [3] 潘钟祥. 不整合对于油气运移聚集的重要性[J]. *石油学报*, 1983, 4 (4): 1-10. [PAN Zhongxiang. Significance of unconformity to oil and gas migration and accumulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1983, 4 (4): 1-10.]
- [4] 吴孔友, 查明, 柳广弟. 准噶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. [WU Kongyou, ZHA Ming, LIU Guangdi. The unconformity surface in the Permian of Junggar Basin and the characters of oil-gas migration and accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29 (2): 53-57.]
- [5] Wu K Y, Paton D, Zha M. Unconformity structures controlling stratigraphic reservoirs in the north-west margin of Junggar basin, Northwest China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7 (1): 55-64.
- [6] 陆克政. 关于不整合的分类和含油盆地不整合的分布[J]. *华东石油学院学报*, 1980 (3): 10-19. [LU Kezheng. On classification of unconformities and their distribution in oil-bearing basin [J]. *Journal of East China Petroleum College*, 1980 (3): 10-19.]
- [7] 艾华国, 兰林英, 张克银, 等. 塔里木盆地前石炭系顶面不整合面特征及其控油作用[J]. *石油实验地质*, 1996, 18 (1): 1-13. [AI Huaguo, LAN Linying, ZHANG Keyin, et al. The characteristics of the unconformity on the top of precarboniferous and its constraints on oil/gas behavior in Tarim Basin [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1996, 18 (1): 1-13.]
- [8] 郭维华, 牟中海, 赵卫军, 等. 准噶尔盆地不整合类型与油气运聚关系研究[J]. *西南石油学院学报*, 2006, 28 (2): 1-3,5. [GUO Weihua, MOU Zhonghai, ZHAO Weijun, et al. Research on the relation of unconformity type with oil and gas migration accumulation at Junggar basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28 (2): 1-3,5.]
- [9] 吴亚军, 张守安, 艾华国. 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. [WU Yajun, ZHANG Shou'an, AI Huaguo. The unconformity types and their relations with oil/gas reservoirs in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1998, 19 (2): 101-105.]
- [10] 周瑶琪, 陆永潮, 李思田, 等. 间断面缺失时间的计算问题: 以贵州紫云上二叠统台地边缘礁剖面为例[J]. *地质学报*, 1997, 71 (1): 7-17. [ZHOU Yaoqi, LU Yongchao, LI Sitian, et al. The missing time calculation of the hiatus surface: a case stude of the upper Permian reefs section at the platform margin, Ziyun, Guizhou [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71 (1): 7-17.]
- [11] Strand K. Sequence stratigraphy of the Karelian formations (2.4-2.0

- Ga) of the Fennoscandian Shield-Significance of major unconformities [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 33 (1): 117-126.
- [12] 常波涛. 陆相盆地中不整合体系与油气的不均一性运移[J]. *石油学报*, 2006, 27 (5): 19-23. [CHANG Botao. Relationship between unconformity system and heterogeneous migration of petroleum in continental basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27 (5): 19-23.]
- [13] 高长海, 彭浦, 李本琼. 不整合类型及其控油特征[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25 (6): 1-7. [GAO Changhai, PENG Pu, LI Benqiong. Unconformity types and their constraints on hydrocarbon behavior [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25 (6): 1-7.]
- [14] Young G M, Caldwell W G E. A new look at an old unconformity: field and geochemical data from James Hutton's original unconformity on the Isle of Arran, Scotland [J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2009, 120 (1): 65-75.
- [15] 高长海, 查明, 曲江秀, 等. 柴达木盆地东部不整合结构的地球物理响应及油气地质意义[J]. *石油学报*, 2007, 28 (6): 32-36. [GAO Changhai, ZHA Ming, QU Jiangxiu, et al. Geophysical response of unconformities and petroleum geological significance in the eastern Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28 (6): 32-36.]
- [16] 侯连华, 罗霞, 王京红, 等. 火山岩风化壳及油气地质意义: 以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40 (3): 257-265, 274. [HOU Lianhua, LUO Xia, WANG Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: a case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40 (3): 257-265, 274.]
- [17] 邹才能, 侯连华, 杨帆, 等. 碎屑岩风化壳结构及油气地质意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 57 (12): 3015-3026. [ZOU Caineng, HOU Lianhua, YANG Fan, et al. Structure of weathered clastic crust and its petroleum potential [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57 (12): 3015-3026.]
- [18] 何登发. 塔里木盆地的地层不整合面与油气聚集[J]. *石油学报*, 1995, 16 (3): 14-21. [HE Dengfa. Unconformities and oil and gas accumulation in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16 (3): 14-21.]
- [19] Prather B E. Controls on reservoir distribution, architecture and stratigraphic trapping in slope settings [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20 (6-8): 529-545.
- [20] 李军, 刘丽峰, 赵玉合, 等. 古潜山油气藏研究综述[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21 (3): 879-887. [LI Jun, LIU Lifeng, ZHAO Yuhe, et al. A review of study on ancient buried hill reservoir [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21 (3): 879-887.]
- [21] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46 (1): 25-38. [XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, et al. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46 (1): 25-38.]
- [22] Araibi A, Stow D, Lever H, et al. The role of the Mid-Cimmerian unconformity on the quality of the underlying Skagerrak sandstone reservoir in the Kittiwake Field, central North Sea [J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2 (4): 254-273.
- [23] 何登发. 不整合面的结构与油气聚集[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34 (2): 142-149, 201. [HE Dengfa. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34 (2): 142-149, 201.]
- [24] 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构模式及半风化岩石的再成岩作用[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27 (3): 270-276. [WU Kongyou, ZHA Ming, HONG Mei. Structural models of unconformity and recurrent diagenesis of semi-weathering rock in Junggar Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27 (3): 270-276.]
- [25] 李晓燕, 蒋有录, 陈涛. 风化粘土层-半风化岩石型不整合的矿物学、地球化学特征[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2009, 34 (3): 428-434. [LI Xiaoyan, JIANG Youlu, CHEN Tao. Mineralogical and geochemical characteristics of unconformity structure with weathered clay and sapropelic rock [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34 (3): 428-434.]
- [26] 宋明水, 赵乐强, 吴春文, 等. 准噶尔盆地车排子地区石炭系顶部风化壳结构及其控藏作用[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37 (3): 313-321. [SONG Mingshui, ZHAO Leqiang, WU Chunwen, et al. Structure and reservoir-controlling of top Carboniferous weathering crust in Chepaizi area, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37 (3): 313-321.]
- [27] 杨德相, 李振明, 田建章, 等. 廊固凹陷奥陶系潜山不整合输导特征与油气优势运聚方向[J]. *地质学报*, 2021, 95 (8): 2575-2589. [YANG Dexiang, LI Zhenming, TIAN Jianzhang, et al. Unconformity characteristics and the dominant migration and accumulation direction of the Ordovician buried hill in the Langgu depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95 (8): 2575-2589.]
- [28] 王晨杰, 张新涛, 徐春强, 等. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及主控因素[J]. *中国海上油气*, 2021, 33 (3): 48-57. [WANG Chenjie, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, et al. Development characteristics and main controlling factors of Mesozoic volcanic reservoirs in northern Bozhong sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33 (3): 48-57.]