

文章编号: 1000-0747(2014)06-0671-10 DOI: 10.11698/PED.2014.06.04

辽河拗陷中基性火成岩相分类及储集意义

黄玉龙¹, 单俊峰², 边伟华¹, 顾国忠², 冯玉辉¹, 张斌², 王璞珺¹

(1. 吉林大学地球科学学院; 2. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB822002)

摘要: 根据岩心、岩屑观察和薄片鉴定, 结合测井相和地震相分析, 建立渤海湾盆地辽河拗陷中基性火成岩相分类体系和识别标准。辽河拗陷新生界中基性火成岩相包括6相16类亚相: 火山通道相(隐爆角砾岩、次火山岩、火山颈亚相), 爆发相(火山碎屑流、热基浪、空落亚相), 溢流相(复合熔岩流、板状熔岩流、玻质碎屑岩亚相), 侵出相(外带、中带、内带亚相), 火山沉积相(再搬运火山碎屑沉积、含外碎屑火山沉积亚相), 侵入相(边缘、中心亚相)。从火成岩结构构造、岩石组合、成因和物源、产状与分布等4方面刻画亚相特征和识别标志。火成岩亚相决定原生储集空间类型及其组合, 并影响后期构造和溶蚀改造作用的方式和强度, 从而控制储集层的物性和有效性。溢流相复合熔岩流、侵出相外带和侵入相边缘亚相是东部凹陷新生界中基性火成岩储集层发育的有利相带, 可作为重点勘探目标。图10表1参14

关键词: 辽河拗陷; 东部凹陷; 中基性火成岩; 岩相; 火成岩储集层; 裂谷盆地

中图分类号: TE122 文献标识码: A

Facies classification and reservoir significance of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Liaohe Depression, East China

Huang Yulong¹, Shan Junfeng², Bian Weihua¹, Gu Guozhong², Feng Yuhui¹, Zhang Bin², Wang Pujun¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, China)

Abstract: The facies classification and corresponding features of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks are studied by analyzing drilling cores, cuttings and corresponding thin sections, as well as well-loggings and seismic profiles related to the boreholes in Liaohe Depression of Bohai Bay Basin. Six facies and sixteen sub-facies are classified: volcanic conduit facies (diatreme, crypto-explosive breccia and post-intrusive sub-facies), explosive facies (pyroclastic flow, surge, and fall deposits sub-facies), effusive lava flow facies (compound flow, tabular flow, hyaloclastite sub-facies), extrusive dome facies (outer zone, intermediate zone, and inner zone sub-facies), volcanoclastic facies (resedimented volcanoclastics, epiclast-bearing volcanogenic deposits sub-facies), and intrusive facies (margin, core sub-facies). The characteristics and recognition of these sixteen volcanic sub-facies are described and summarized in detail concerning their primary volcanic textures, structures, lithologic assemblages, genesis and material source, spatial occurrence and distribution. Volcanic sub-facies is the primary controlling factor on volcanic reservoir spaces and their configurations. They constrain the styles and degrees of subsequent tectonic fracture and secondary dissolution of the volcanics, thus determining the porosity, permeability, and efficiency of volcanic reservoirs. Three favorable reservoir facies belts in the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Eastern Sag of Liaohe Depression are compound lava flows, outer zone of extrusive dome, and margin of intrusive sub-facies. They should be taken as the major exploration targets of the volcanic reservoirs.

Key words: Liaohe Depression; Eastern Sag; intermediate and mafic igneous rock; lithofacies; volcanic reservoir; rift basin

0 引言

火成岩相是指火山作用后的某一特定产物及其组合形式, 综合反映喷出物的喷发方式、就位环境、成岩过程及其在火山机构中所处空间位置等^[1-4]。火成岩相分析和解译对于厘清火成岩时空分布、刻画火成岩体内部结构以及阐明火山-沉积地层成矿机理^[5-6]等具有重要意义。

火成岩油气藏是一种以火成岩为储集层的特殊类

型油气藏, 其储集性能主要受岩相控制、与岩性无直接关联^[7]。由于不同喷发方式和成岩过程对火成岩的原生储集空间形成具有决定性作用, 因此火成岩相的合理划分对于后续储集层研究十分关键。在中国准噶尔、松辽和渤海湾等盆地为代表的古生界—新生界地层中发现了不同规模的中基性火成岩油气藏^[8-9], 尤其在渤海湾盆地辽河拗陷新生界各地层中均发育规模不等的中基性火成岩, 其发育层系、岩石类型、就位环境和产状分布等都具有复杂性和代表性^[10]。

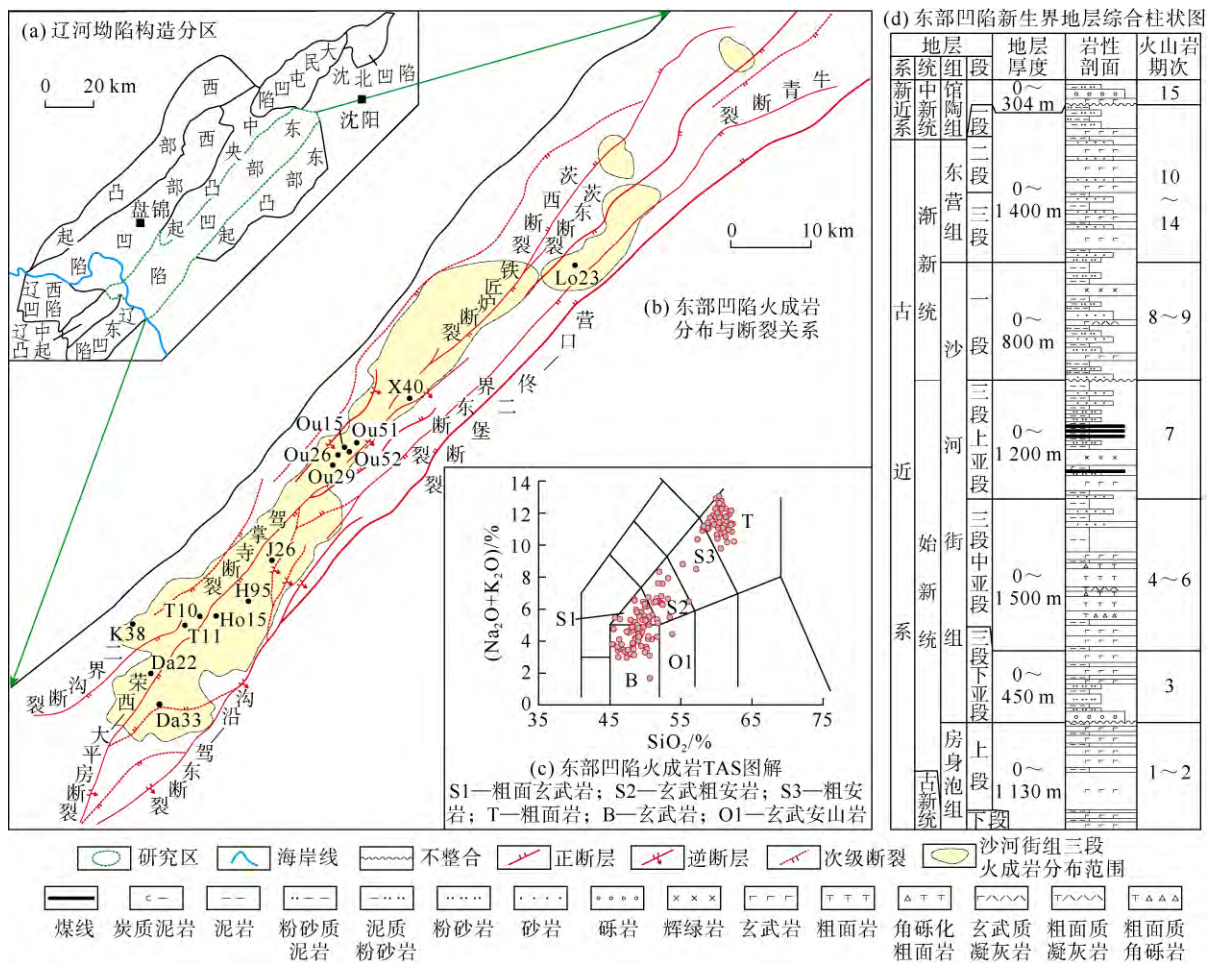
本次研究以钻井岩心岩屑、测井、录井和地震资料为依据,结合辽河拗陷新生界火成岩地质特征,综合考虑火成岩成因机制、就位环境和空间分布以及储集性能等因素,建立中基性火成岩相分类体系及其识别标准,并指出有利储集层发育的优势亚相。

1 研究区地质背景

辽河拗陷是中新世发育的大陆裂谷盆地,呈北东—南西向展布,面积约为 12 400 km²。其陆上部分由 4 个凹陷、3 个凸起共 7 个二级构造单元组成(见图 1a),各二级构造单元均为狭长的条带状、呈北东向展

布。受郯庐断裂带长期活动的影响,拗陷内发育一系列北东或北北东向的断裂系统(见图 1b)。

在郯庐断裂多期活动以及印度和太平洋板块斜向俯冲的叠加作用下,辽河拗陷自中生代以来发生了多期岩浆活动,尤其新生代火山活动极为频繁。古近系房身泡组—新近系馆陶组共发育 15 期火成岩,以玄武岩、粗面岩和辉绿岩为主,兼具喷出和侵入、陆上与水下堆积特征的多层系、多类型火成岩组合^[11]。辽河拗陷东部凹陷新生界火成岩分布最为广泛,自下而上在房身泡组、沙河街组、东营组和馆陶组中均有发育(见图 1c、1d)。



辽河拗陷新生界先后经历了初始断陷、强烈断陷、持续断陷和萎缩期 4 个演化阶段^[10]:初始断陷阶段(房身泡组沉积期),火山活动以基性岩浆陆上裂隙式喷发为主;强烈断陷期(沙三段沉积期),表现为大规模拉张裂陷背景下的快速沉降和多沉降-沉积中心,火山活动以水下喷发为主,发育大套玄武岩和粗面岩,多与烃源岩互层构成有利的油气成藏组合;断陷扩展期(沙一段—东营组沉积期),火山活动中心向东部凹陷南北两

端迁移,以基性岩浆陆上间歇式喷发为主,东营组沉积末期,未喷出地表的基性岩浆侵入沙一段和沙三段中,以辉绿岩侵入体形式产出;自馆陶组沉积开始进入盆地萎缩期,火山活动减弱,局部形成陆上溢流玄武岩。

2 中基性火成岩相分类体系

总结和对比国内外火成岩相分类原则与分类方案,结合拗陷东部凹陷新生界火成岩发育的地质特征,

通过钻井岩心岩屑资料的精细描述，以及与国内外典型实例的对比分析，归纳建立了辽河拗陷新生代以中基性火成岩为主、兼具喷出和侵入、陆相与水下喷发等特征的火成岩岩相分类体系和识别标准（见表 1）。

表 1 辽河拗陷新生代中基性火成岩相分类及亚相特征

相	亚相	典型结构和构造	特征岩性	形成机制和物质来源	产状和空间分布	储集空间主要构成
火山通道相 (地下封闭环境—地表半开放环境)	隐爆角砾岩	隐爆角砾结构 锯齿状拼合构造	玄武质/粗面质 隐爆角砾岩	高压流体沿先期裂隙灌入并产生爆炸使围岩破碎，爆炸-充填同步进行	火山口附近、次火山岩顶部或穿入围岩	隐爆缝
	次火山岩	斑状结构、全晶质中—细粒结构，柱状、板状节理	粗面斑岩、 细晶岩	火山活动晚期滞留于地下浅部的岩浆侵入围岩中固结形成，与喷出岩同源	于火山通道浅部或充填环状、锥状和放射状裂隙；切割围岩呈不整合侵入，或平行于围岩呈整合侵入	收缩缝 构造缝
	火山颈	堆砌结构，环状、柱状、放射状节理	熔岩、火山碎屑熔岩、(熔结)火山碎屑岩	未喷出地表的残余岩浆停留并充填于火山通道内冷凝固结，或由火山口塌陷回填形成	位于岩穹和火山口之下，产状近于直立，穿入围岩	粒间孔 收缩缝 构造缝
爆发相 (地表开放环境)	火山碎屑流	火山碎屑结构、熔结结构	(熔结)火山碎屑岩、火山碎屑熔岩	含挥发分的灼热碎屑混合物在后续喷出物推动和自身重力作用下沿地表流动形成的高密度重力流堆积	爆发相上部，与溢流相过渡；受古地形控制，侧向堆积、充填洼地	粒间孔 溶蚀孔
	热基浪	凝灰结构，平行层理、交错层理、波状层理	玄武质岩屑/晶屑凝灰岩，粗面质岩屑/晶屑凝灰岩	气射作用的气-固-液态多相低密度重力流近地表呈悬移质快速搬运	爆发相中下部或与空落亚相互层；低洼处厚，沿古地形呈披覆状，侧向堆积	粒间孔 溶蚀孔
	空落	凝灰结构，颗粒支撑，粒序层理	玄武质凝灰岩、粗面质凝灰岩	气射作用的固态和塑性喷出物在重力作用下作自由落体运动，经风成或水成分离作用后堆积压实成岩	爆发相下部，向上变细变薄，也可呈夹层；围绕火山口呈环状、面状披覆堆积	溶蚀孔
溢流相 (地表开放环境)	复合熔岩流	玻基斑状结构、间隐结构，气孔-杏仁构造、枕状构造	气孔-杏仁玄武岩、枕状玄武岩	熔浆沿熔岩管道流动溢出，多次叠加形成薄层交织状熔岩流，气孔分带性不明显	薄层交织状、瓣状叠加；单个熔岩朵叶体平面延伸范围小，连续性差	气孔 溶蚀孔 收缩缝
	板状熔岩流	间粒结构，块状构造，柱状、板状节理	致密玄武岩、粗面岩	岩浆自通道溢出后沿地表快速流动形成的厚层平板状、扁平状熔岩流	厚层平板状、成层性好；延伸范围广，连续性好	收缩缝 构造缝
	玻质碎屑岩	淬碎角砾结构、玻璃质结构，角砾状构造	角砾化玄武岩、玄武质(角砾)凝灰熔岩	熔浆与水接触或进入含水的松散沉积物中，经淬火冷凝而快速堆积形成各种粒级的角砾状玻璃质碎屑	倾斜状，加积式前积结构	砾间缝 溶蚀缝 构造缝
侵出相 (地表半开放环境)	外带	自碎/淬碎角砾结构、玻璃质结构，放射状裂隙	角砾化粗面岩、粗面质角砾/集块熔岩	侵出岩穹的外部，熔岩由于膨胀、自身重力和淬火等作用呈角砾状	岩穹(中心式)岩脊(裂隙式)；在火山颈之上呈穹窿状、钟状、塞状、蘑菇状等正向地形	溶蚀孔 砾间缝 溶蚀缝
	中带	霏细结构、微晶结构，流动构造	微晶粗面岩	侵出岩穹的中部，介于外带和内带之间		溶蚀孔 收缩缝
	内带	粗面结构、多斑/聚斑/碎斑结构，块状构造	块状粗面岩、粗面斑岩	侵出岩穹的核部，高黏度熔浆受到内力挤压流动，停滞并堆砌在火山通道之上		收缩缝 构造缝
火山沉积相 (地表水域环境)	再搬运火山碎屑沉积	沉火山碎屑结构，粒序层理、水平层理	沉凝灰岩、沉火山角砾岩、沉集块岩	原生火山物质在火山作用准同期内经搬运、改造后再沉积	火山口湖，火山机构穹隆之间的低洼地带，远源相带	粒间孔 溶蚀孔
	含外碎屑火山沉积	碎屑结构，交错层理、粒序层理	凝灰质泥岩、凝灰质砂岩、凝灰质砾岩	原生火山物质在火山作用期后经风化剥蚀，在搬运、改造中与较多非火山碎屑相混	火山机构穹隆之间的低洼地带，远源相带，火山地区的河湖环境	粒间孔 溶蚀孔
侵入相 (地下封闭环境)	边缘	细粒结构、斑状结构、辉绿结构、流动构造，水平节理	辉绿岩、辉长岩	火山复活期内，岩浆于地下深部侵入到围岩之中形成的具有独立形态的地质体	呈岩床、岩墙、岩盆、岩盖、岩株等，包括顺层整合侵入和穿层不整合侵入	溶蚀孔 收缩缝 构造缝
	中心	中粗粒结构、辉绿-辉长结构；块状构造	辉绿岩、辉长岩			收缩缝 构造缝

依据岩浆作用方式（爆发、溢流、侵出或侵入）和就位环境（封闭、半开放、开放和水域环境）的不同，同时考虑火山机构不同部位物质组成的差异，将中基性火成岩相划分为火山通道相、爆发相、溢流相、

侵出相、火山沉积相和侵入相 6 种类型。进一步结合岩石结构、构造、岩性组合及其纵向序列等基本地质属性所揭示的火成岩形成机制、产状和空间分布等特征，总结归纳出 16 种亚相及其识别标志。

参照分类中的鉴定标志可在剖面、岩心、岩屑和薄片尺度上识别出各种火成岩相及亚相,通过地质属性与地震、测井响应分析,可解决火成岩测井和地震识别等问题。此外,分析岩相与储集空间和储集层物性的关系,可在岩相和亚相识别基础上初步评价火成岩储集性能,明确储集层控制因素和分布规律。

3 中基性火成岩相及亚相地质特征和识别标志

基于辽河拗陷东部凹陷 105 口井总长 47 700 m 火山岩井段、1 110 m 岩心和 2 800 余件薄片(岩心薄片 850 件、岩屑薄片 1 800 件、铸体薄片 150 件)岩矿鉴定的岩相、亚相特征,总结出中基性火成岩 6 相 16 亚相的岩石结构、构造类型及其特征。结合钻井岩性序列分析、测井相分析和地震相解译等,分析了火成岩相和亚相的

岩石组合及其纵向序列、产状和空间分布(见表 1)。

3.1 火山通道相

火山通道相包括火山颈、次火山岩和隐爆角砾岩 3 类亚相,三者空间上相互连接或呈穿切关系。钻井揭示火山通道相在东部凹陷新生界火成岩井段中约占 4.4%。火山通道相位于火山机构主体下部和近中心部位,是岩浆向上运移到达地表过程中,滞流和回填在岩浆主通道及其分支管道中形成的各种火成岩类组合。

火山颈亚相指岩浆房之上、火山口之下,原位存留和回填在火山通道内的火山喷出物共生组合体,产状近于直立或呈倾斜状,截面显示为“上宽下窄”,呈漏斗状、管状和墙状,多穿切围岩。鉴别特征是不同的岩性、不同结构、不同颜色的熔岩与火山碎屑(熔)岩混杂,最明显的标志是在剖面、岩心和薄片尺度上呈现类似混凝土的“堆砌结构”(见图 2a、2b)。

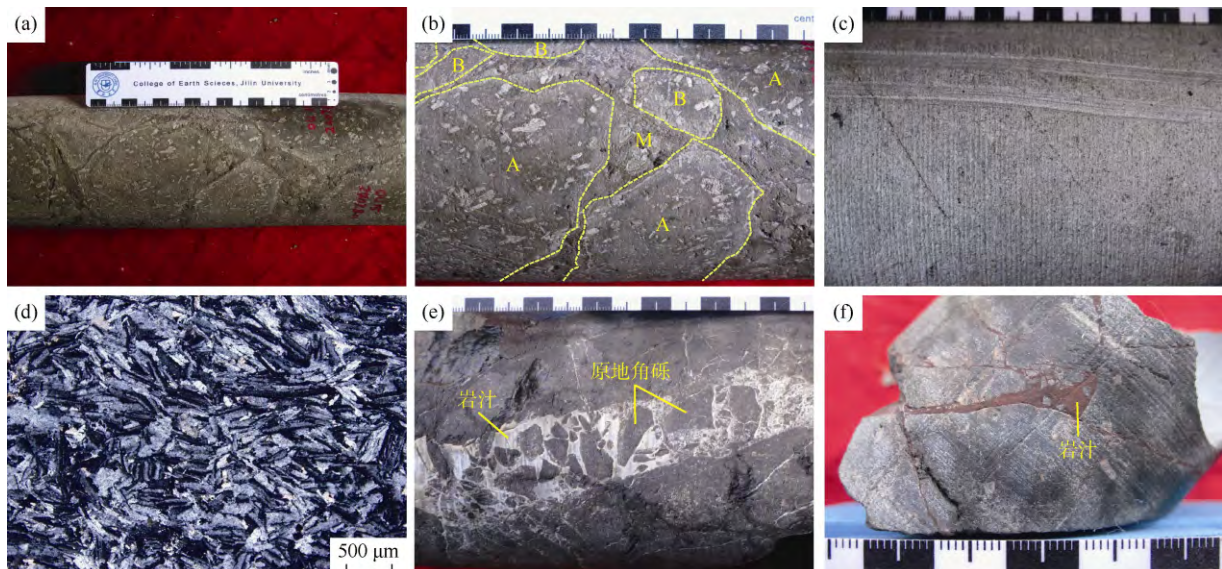


图 2 火山通道相 3 类亚相典型岩心及薄片显微特征
(a) Ou15 井, 2 402.56 m, 火山颈亚相, 粗面质集块岩, 火山集块结构, 堆砌结构; (b) 图 (a) 放大照片, 粗面岩集块(A)和角砾(B)具浅色边, 基质(M)由细小角砾(直径小于 1 cm)和火山灰组成; (c) Da33 井, 3 003.3 m, 次火山岩亚相, 细晶岩, 块状构造; (d) 图 (c) 的薄片显微照片, 岩石由碱性长石组成, 具全晶质细粒结构, 正交偏光; (e) Ho15 井, 1 939.69 m, 隐爆角砾岩亚相, 原岩为玄武岩; (f) X40 井, 3 537.31 m, 隐爆角砾岩亚相, 原岩为粗面岩

图 2 火山通道相 3 类亚相典型岩心及薄片显微特征

次火山岩亚相指与其他岩相和围岩呈指状交切或呈岩脉形式嵌入,未喷出地表的岩浆于地下侵位形成的同期小型超浅成侵入体。次火山岩与喷出岩是同源、同期岩浆活动的产物,两者岩石外观相似(见图 2c、2d),但次火山岩结晶程度相对较好,基质多为全晶质结构(见图 2d),且内部分异、同化不强,呈块状构造,成分比较均一,结构、构造分带性不明显,自岩体边缘至中心呈均一过渡。平面上多形成于火山口附近,纵向上自火山口向下几百米至 1 500 余米。

隐爆角砾岩亚相是由高压流体地下隐伏爆炸、造

缝/破碎、运移、灌入/胶结等一系列作用对围岩叠加改造的产物,形成于岩浆旋回的同期或准同期,位于火山口附近或次火山岩体顶部,穿切其他岩相或围岩。鉴别特征是在手标本和薄片尺度上可识别出隐爆角砾结构,即岩石被枝杈状、网脉状裂缝分割成角砾状,角砾颜色和成分一致,位移不大、视域范围内茬口可拼接复原(见图 2e、2f)。

3.2 爆发相

爆发相指爆炸式火山喷发作用产物的堆积组合体。研究区爆发相发育厚度约占 9.8%,发育于周期性

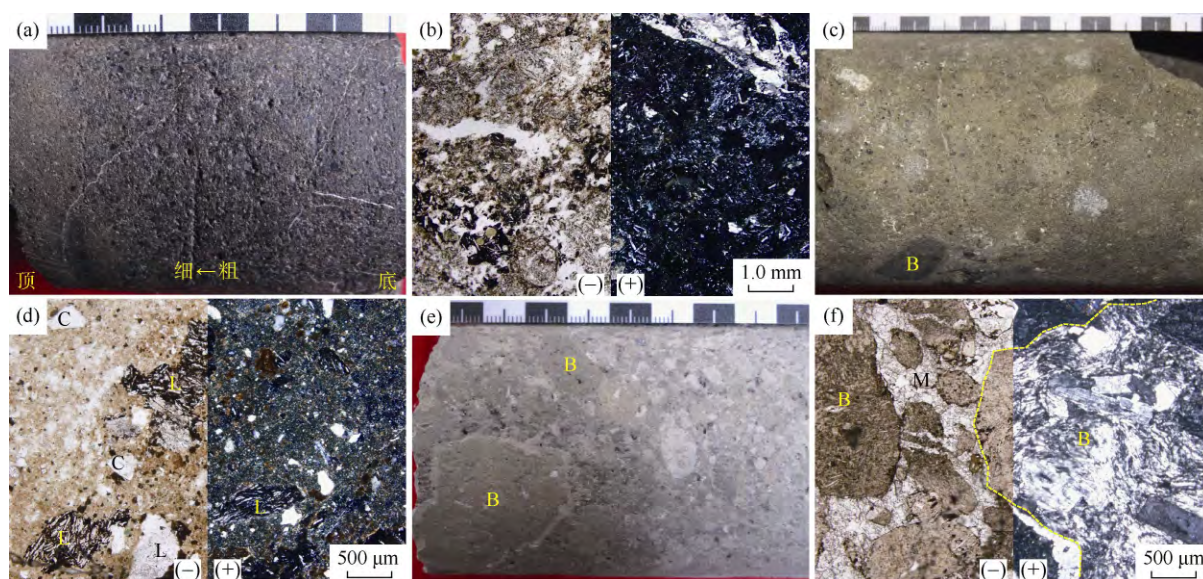
火山活动的早期。根据火山碎屑的成因和搬运机制不同,可细分为空落、热基浪和火山碎屑流 3 类亚相,可依据碎屑物粒度、分选以及层理等特征加以辨识。

空落亚相亦称坠落亚相,指爆炸飞溅到空中又因重力坠落到地表或水底的火山喷出物堆积体。主要岩性为含塑性(火山弹)和刚性岩块(集块)的粗面质/玄武质凝灰岩,发育块状层理和粒序层理,分选较好(见图 3a、3b)。局部可见火山弹或浮岩块坠落其中扰动形成的“坠石构造”。

热基浪亚相指火山碎屑涌浪沉积过程中由载屑蒸汽流极快速搬运-沉积的火山碎屑堆积物,分选中等,层理极为发育。热基浪亚相的堆积物顺古地形呈幔状

覆盖,低洼处堆积物厚度明显大于高部位。岩屑和晶屑含量较高(见图 3c、3d),宏观尺度上可见各种层理构造,局部可见砂丘或逆行砂丘。

火山碎屑流亚相指爆炸式火山喷发产生的各种火山碎屑物快速搬运-沉积后形成的堆积物复合体,主要由喷发柱崩塌形成的高密度气体-固体混合物扩散,进而沿地表快速搬运形成重力流堆积,也包括由熔岩穹丘或熔岩流外/表层在重力或爆炸作用下崩塌破碎后形成的碎屑流堆积。岩石分选差,以粗粒火山碎屑为主(见图 3e、3f),含塑性玻屑、浆屑,具“焊接”特征。单层内部通常不发育层理,可见正粒序,多个冷却单元叠加时显示出粗—细韵律层理。



(a) Ou29 井, 2 490.61 m, 空落亚相, 玄武质凝灰岩, 细粒凝灰结构, 粒序层理, 岩石全部由凝灰级(直径小于 2 mm)的火山碎屑物组成;(b) 图(a)对应的薄片显微照片;(c) Da22 井, 2 469.56 m, 热基浪亚相, 玄武质晶屑岩屑凝灰岩, 含角砾(B);(d) 图(c)对应的薄片显微照片, 由长石晶屑(C)、玄武岩岩屑(L)和细粒火山灰组成, 基质支撑;(e) Ou51 井, 3 195.48 m, 火山碎屑流亚相, 粗面质角砾岩, 角砾呈次棱角状一次圆状;(f) 图(e)对应的薄片显微照片, 颗粒支撑为主、基质支撑次之

图 3 爆发相 3 类亚相典型岩心及薄片显微特征

3.3 溢流相

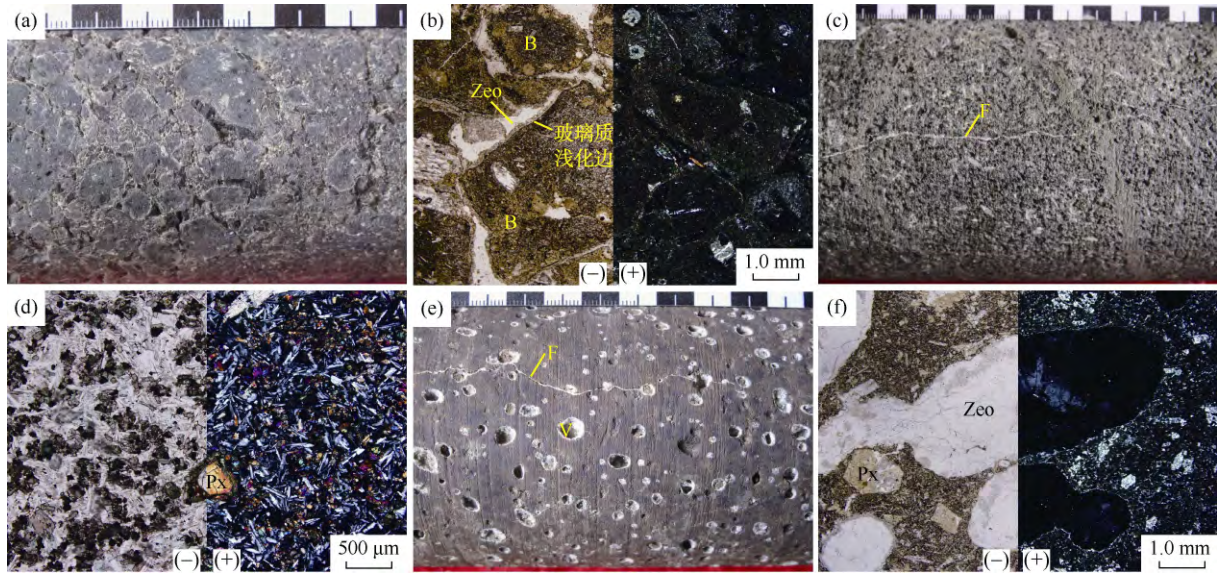
溢流相是洪泛式熔岩流经过流动、冷凝、堆积、叠加的复合体。溢流相在本区最为发育(占 62.6%), 新生界各个层系中均有分布, 发育于各期火山活动的主喷发期。根据喷发机制和就位环境不同, 分为玻质碎屑岩、板状熔岩流和复合熔岩流 3 类亚相, 可据致密、气孔和角砾化熔岩的组合及其相对比例予以辨别。

玻质碎屑岩亚相是岩浆于水下就位的典型代表, 广泛发育于沙三段(强烈断陷、湖盆最大扩张期)。特征岩性是具淬碎角砾结构、玻璃质结构和角砾状构造的角砾化玄武岩(见图 4a、4b), 钻井显示其上下多发育厚层暗色泥岩。其岩性单一, 测井特征为呈低幅微齿化的平滑曲线(见图 5a)。玻质碎屑岩亚相既可由岩

浆于水下喷出、就位形成, 亦可由陆上喷出的岩浆沿地表流入湖盆之中形成。

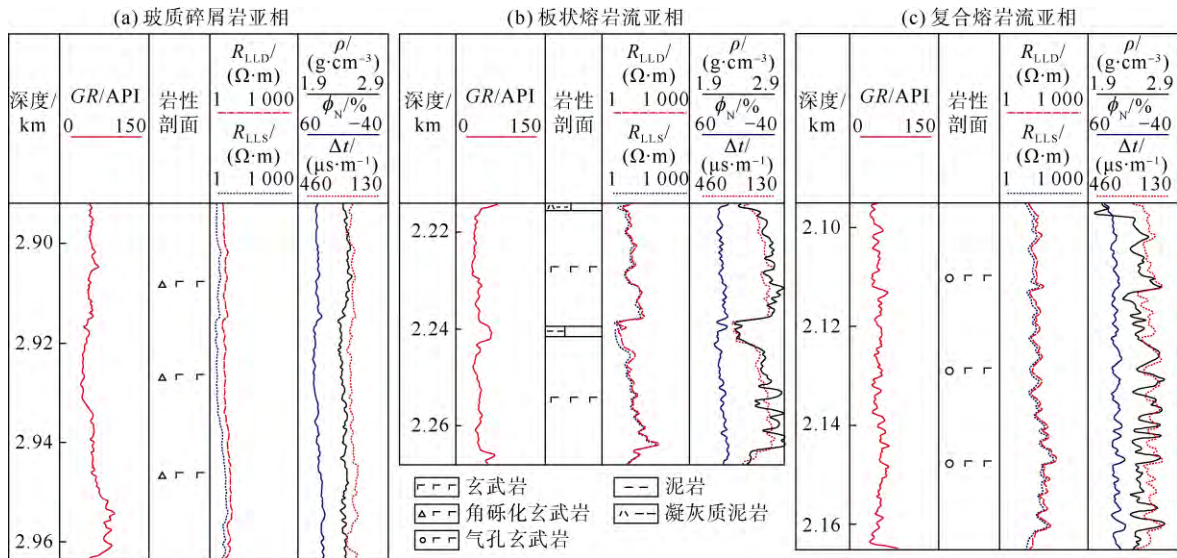
板状熔岩流亚相是指厚层平板状横向扩展熔岩流, 单层厚度数米至几十米, 横向连续性好, 延伸可达数千米。单层熔岩内部具有典型的气孔垂向分带性, 表现为上部和下部气孔发育, 而中间气孔少或呈致密块状(见图 4c、4d)。相邻两层板状熔岩流之间常发育数米厚的沉积岩夹层。气孔发育段呈高声波时差、低密度和低电阻率特征, 而致密段呈低声波时差、高密度、高电阻率特征(见图 5b)。

复合熔岩流亚相指多期薄层交织状熔岩流叠加形成的堆积复合体。单层横向延伸范围小、连续性差, 常见于小规模、低黏度的玄武质熔岩中, 主要由单次



(a) Ou52 井, 2 773.4 m, 玻质碎屑岩亚相, 角砾化玄武岩, 碎碎角砾结构; (b) 图 (a) 对应的薄片显微照片, 角砾 (B) 为玻基斑状玄武岩, 具玻璃质浅化边, 角砾间充填沸石(Zeo); (c) K38 井, 2 361.93 m, 板状熔岩流亚相, 粒玄武岩, 致密块状, 发育一组近垂直裂缝 (F); (d) 图 (c) 对应的薄片显微照片, 间粒结构, 少斑结构, 斑晶为辉石(Px); (e) T11 井, 1 985.61 m, 复合熔岩流亚相, 气孔-杏仁构造玄武岩, 气孔(V)发育; (f) 图 (e) 对应的薄片显微照片, 气孔中充填物为沸石 (Zeo)

图 4 溢流相 3 类亚相典型岩心及薄片显微特征



GR—自然伽马; R_{LLD} —深侧向电阻率; R_{LLS} —浅侧向电阻率; ρ —密度; ϕ_N —中子孔隙度; Δt —声波时差

图 5 溢流相 3 类亚相测井响应特征

喷发量相对较少的高频火山喷发形成, 由多个单层厚度介于数十厘米至数米的小型辫状流动单元组成, 单层内部由含管状气孔-杏仁体的底壳、块状构造核部和气孔-杏仁构造上部外壳组成 (见图 4e、4f)。由于连续喷发而形成的多个流动单元之间往往难以确定明显的界线, 因此其内部气孔-杏仁构造玄武岩和致密玄武岩互层, 或多孔与少孔玄武岩互层, 二者累计厚度比约为 4 5~10 7, 表明气孔带与少孔/致密带厚度相当或略厚。测井特征为声波时差、密度、补偿中子和电阻率等曲线呈指状叠加 (见图 5c), 每个指状单元对

应于一个熔岩流动单元。

溢流相 3 类亚相就位环境和空间分布存在差异:

①就位环境不同, 玻质碎屑岩亚相为水下就位产物, 板状和复合熔岩流亚相为陆上就位产物; ②平面分布位置不同, 三者从近及远依次为复合熔岩流、板状熔岩流和玻质碎屑岩。

3.4 侵入相

侵入相指较黏稠的岩浆 (温度较低、硅质含量较高、挥发分含量较少), 自火山通道中被“挤牙膏”式推举出地表而形成的熔岩穹丘, 形成于火山喷发中后

期，堆积在火山机构上部。在新生界火成岩中约占 13.1%，主要分布在沙三段中亚段，岩性为粗面岩类。

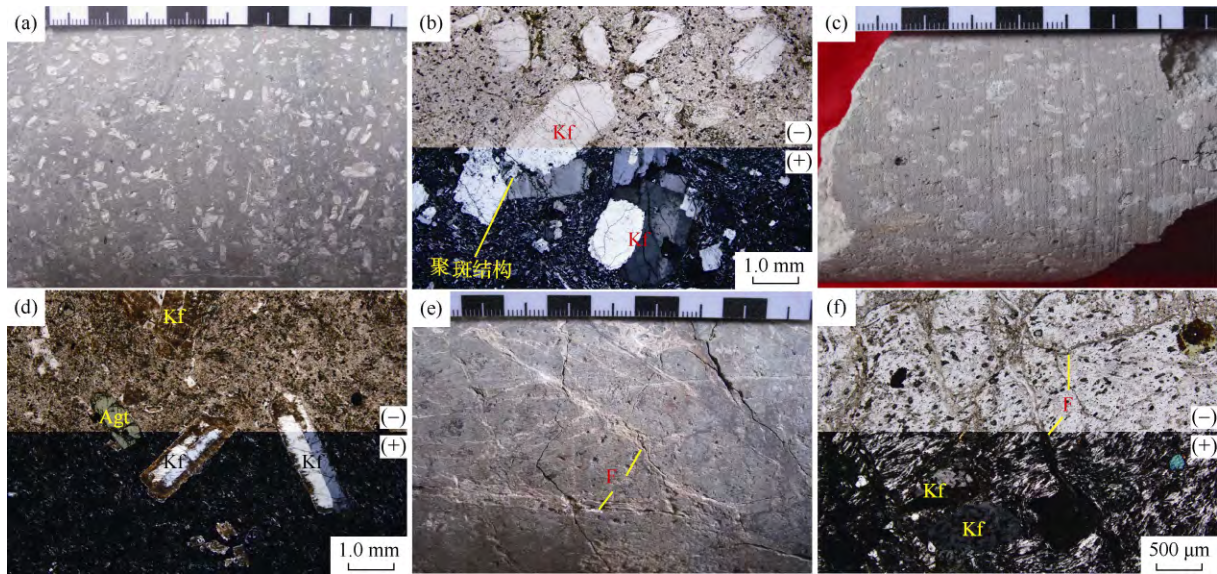
侵出相属于非层状喷出相，中心式喷发形成熔岩丘，裂隙式喷发形成熔岩脊。高度为几十米至数百米，一般为 100~300 m；直径几百米到千余米，以 2 000~4 000 m 为主；纵横比高，多大于 1/8，以 1/3~1/2 为主。富含斑晶，具有聚斑、碎斑结构，斑晶含量可达 30% 以上。基质结晶程度具分带性，即外部/边缘为玻璃质结构，中部/过渡带为霏细质结构，内部为显微粒状结构（见图 6）。根据侵出相结构构造的差别，由内而外划分为内带、中带和外带 3 类亚相。

内带亚相位于侵出岩穹的核部，代表岩性为块状构造粗面岩，岩石富含斑晶（含量可达 30% 以上），具

粗面、多斑、聚斑、碎斑结构（见图 6a、6b），块状构造，发育柱状和板状节理。

中带亚相位于侵出岩穹的中部，距火山口相对较远，有一定流动距离，流动构造是其与内带亚相的重要区别之处。中带亚相代表岩性为玻璃质粗面岩和微晶粗面岩，岩石特征介于内带和外带之间，以基质微晶结构和霏细结构为标志（见图 6c、6d）。

外带亚相位于侵出岩穹的外部，且多与溢流相呈过渡关系，常见强烈塑变的流动构造。代表岩性为具淬碎角砾结构或自碎角砾结构的粗面质角砾熔岩和角砾化粗面岩。熔岩在内部膨胀、自身重力和淬火等作用形成原位角砾，具有暗化或浅色边缘，基质多为隐晶质—玻璃质结构（见图 6e、6f）。



(a) Ou52 井，2 682.64 m，内带亚相，粗面岩，块状构造；(b) 图 (a) 对应的薄片显微照片，多斑、聚斑结构，斑晶全为钾长石 (Kf)，基质为粗面结构；(c) Ou51 井，2 830.70 m，中带亚相，粗面岩，斑状结构，块状构造；(d) 图 (c) 对应的薄片显微照片，斑晶为钾长石 (Kf) 和霓辉石 (Agt)，基质为微晶结构；(e) Ou29 井，2 217.00 m，外带亚相，角砾化粗面岩，自碎角砾结构；(f) 图 (e) 对应的薄片显微照片

图 6 侵出相 3 类亚相典型岩心及薄片显微特征

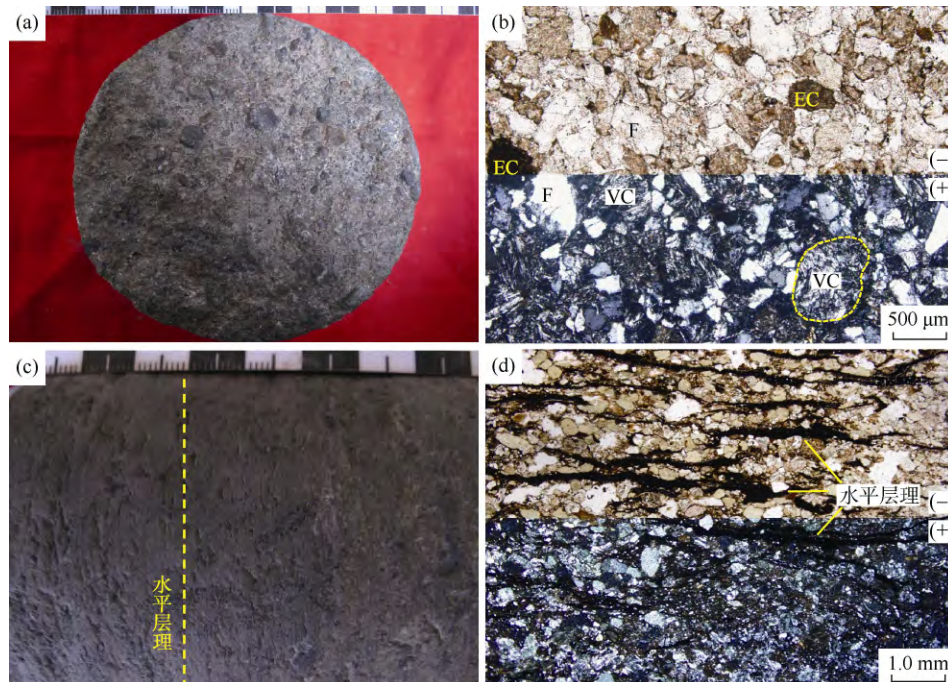
3.5 火山沉积相

火山沉积相为原生火山碎屑物（或熔浆）初始就位后，经再次或多次搬运-沉积而成的、以火山碎屑为主的沉积复合体，在研究区新生界火成岩地层中约占 9.4%。火山沉积相与火成岩共生，与其他岩相呈侧向相变或夹层形式产出，岩性主要为火山碎屑含量占 10%~90% 的火山碎屑沉积岩和沉火山碎屑岩。碎屑成分包括火山碎屑和外来碎屑，根据两者相对比例、磨圆度、分选性以及层理特征等划分为含外碎屑火山沉积亚相和再搬运火山碎屑沉积亚相。

含外碎屑火山沉积亚相是原始喷发火山碎屑物（或熔浆）初次就位或冷凝固结，后经风化剥蚀形成的碎屑物，与外来碎屑相混堆积而成的岩体。代表岩

性为见有层理的、火山碎屑含量在 10%~50% 的火山碎屑沉积岩，包括凝灰质泥岩、凝灰质砂岩和凝灰质砾岩（见图 7a、7b）。碎屑磨圆度和分选好、非火山碎屑含量大于 50% 是其主要鉴定标志。

再搬运火山碎屑沉积亚相是在火山作用同期或准同期内，由熔岩穹丘或熔岩流外缘的崩塌物以及未固结成岩的火山碎屑物经水流及风力作用再次或多次搬运，于火山机构的低部位堆积和压实而形成的岩体。搬运过程中可有少量外碎屑加入（含量少于 10%）。其主要由角砾级和凝灰级火山碎屑组成，常见层理构造，如水平层理沉凝灰岩层等（见图 7c、7d）；具有一定的磨圆度，分选中等或差，具水平层理、外碎屑含量少是其主要鉴定标志。



(a) Ou52 井, 2 617.80 m, 含外碎屑火山沉积亚相, 凝灰质含砾粗砂岩, 碎屑结构; (b) 图 (a) 对应的薄片显微照片, 由火山碎屑 (VC)、外碎屑 (EC) 和长石碎屑 (F) 组成, 分选中等—好, 有一定磨圆度; (c) Lo23 井, 3 099.56 m, 再搬运火山碎屑沉积亚相, 玄武质凝灰岩, 具水平层理; (d) 图 (c) 对应的薄片显微照片, 由细粒火山碎屑组成, 分选中等—差

图 7 火山沉积相两类亚相典型岩心及薄片显微特征

3.6 侵入相

辽河油田近年在小型层状侵入体与围岩界面附近发现多个工业油藏, 表明后期岩席/岩脉也是重要的储集岩类。东部凹陷沙三段和沙一段发育具有一定规模的东营组沉积期辉绿岩, 形成时间晚于所就位的地层时代, 且部分具明显的穿层性, 据此可确定为侵入成因。依据围岩接触关系, 可分为整合侵入体和不整合侵入体两类 (见图 8)。侵入岩与围岩相比密度较大, 地震

反射特征为强振幅 (地震剖面上显示为“强轴”), 沿断层两侧分布, 远离断层方向逐渐尖灭 (见图 8), 自断层向两侧延伸几百米至几千米。

从火成岩储集层研究角度, 按侵入岩体与围岩接触面距离由近到远, 将侵入相划分为边缘亚相和中心亚相。二者在结晶程度、蚀变情况与裂缝发育特点等方面有明显差别 (原生与次生孔缝组合及其发育程度不同)。

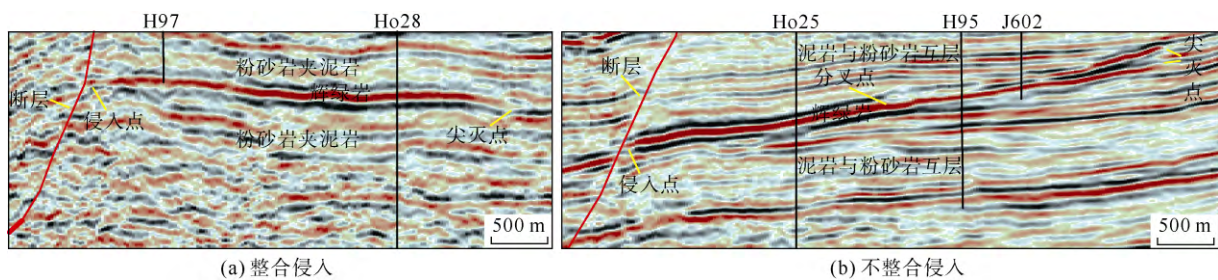
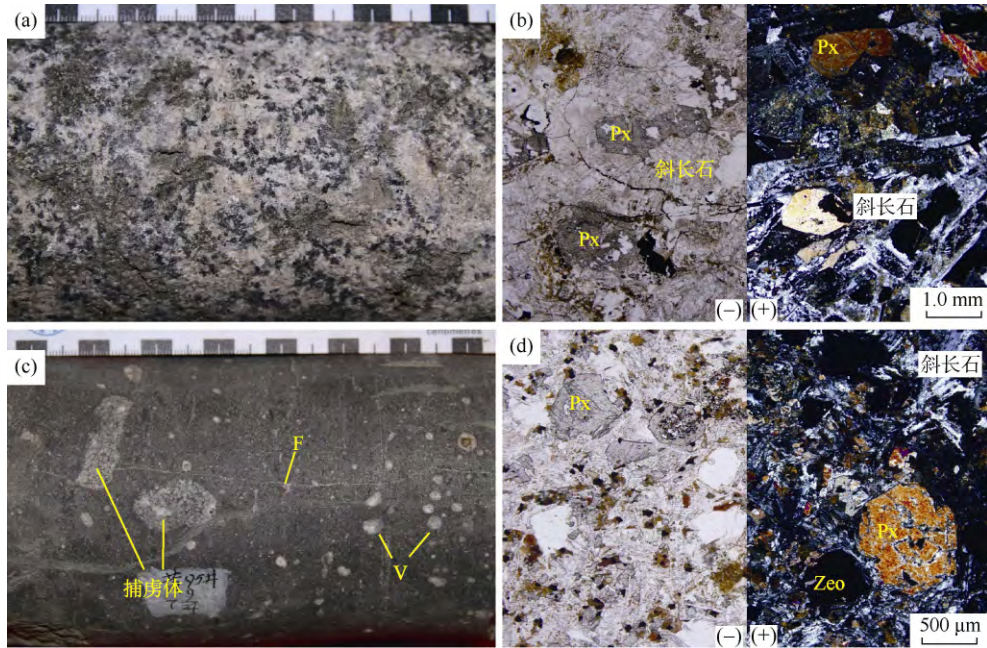


图 8 基性侵入体的地震相特征

中心亚相分布于侵入岩体内部, 在外层的保温下冷却速度相对缓慢, 岩石粒度较粗, 多呈等粒结构或似斑状结构, 块状构造。厚层岩体 (大于 50 m) 内部的岩石呈全晶质中—粗粒结构, 辉石和长石晶体直径普遍大于 1 mm, 呈自形—半自形, 具辉长结构、辉绿—辉长结构 (见图 9a、9b)。

边缘亚相分布在侵入岩体边部, 厚度数米, 与围

岩直接接触, 因此处岩浆冷却速度快, 故岩石多呈细粒结构, 常见沿侵入方向的流动构造和串珠状气孔群, 可见围岩捕虏体 (见图 9c、9d), 其发育与岩体和围岩接触面平行的原生层节理。边缘亚相厚度虽小于中心亚相, 但储集意义重大, 已发现的与侵入岩相关的油气藏主要赋存在边缘亚相及其与围岩接触带中, 与界面附近次生溶蚀改造作用密切相关。



(a) H95 井, 2 708.91 m, 中心亚相, 辉长岩, 块状构造; (b) 图 (a) 对应的薄片显微照片, 中—粗粒粒状结构, 辉长结构; (c) H95 井, 2 649.80 m, 边缘亚相, 辉绿岩, 含捕虏体、气孔 (V) 和节理缝 (F); (d) 图 (c) 对应的薄片显微照片, 细粒粒状结构, 斑状结构

图 9 侵入相两类亚相典型岩心及薄片显微特征

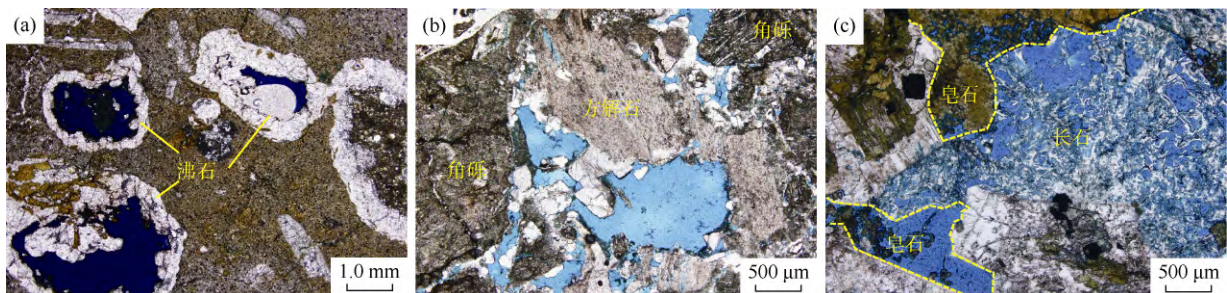
4 火成岩相的储集意义

火成岩储集空间由原生和次生两部分构成, 不同火成岩亚相的成岩方式决定原生孔隙和裂缝的类型、组合及空间分布^[12], 并影响火成岩次生改造作用的方式和强度, 最终导致不同亚相储集空间的构成存在差异, 从而间接控制火成岩储集层的有效性和空间分布。

火成岩相与储集层物性密切相关^[13], 而储集层物性的差异直观体现为有效储集空间的发育程度。除了受火成岩矿物次生蚀变影响外, 储集层主要由不同火成岩亚相原生储集空间的发育特征和后期界面改造两因素决定。不同岩相和亚相的原生储集空间类型、组合方式和发育程度具有显著差异, 原生孔隙和裂缝不仅直接构成油气的储集空间, 而且还可为火成岩的次生改造提供流体运移的通道。岩心观察和铸体薄片分

析可直观确定孔隙和裂缝的发育情况, 结合取心段岩样常规物性测试的孔隙度和渗透率及孔隙度测井曲线特征, 发现研究区 16 种火成岩亚相中, 溢流相复合熔岩流亚相、侵入相外带亚相和侵入相边缘亚相的储集空间最为发育 (见图 10)。一方面, 这 3 类亚相的原生孔隙和裂缝发育, 为后期溶蚀改造提供了先期条件, 其中, 复合熔岩流亚相玄武岩发育原生气孔和收缩缝, 外带亚相粗面岩发育砾间缝和收缩缝, 边缘亚相辉绿岩发育收缩缝和少量原生气孔 (见表 1); 另一方面, 火成岩地层内部各级界面附近的火成岩受到的溶蚀改造最为强烈, 如复合熔岩流亚相内部发育多个流动单元界面, 外带亚相和边缘亚相分别处于侵入相和侵入相岩体与其他火成岩相或者沉积地层界面处, 这 3 类亚相普遍发育大量溶蚀孔 (见图 10)。

相比较而言, 次火山岩亚相、板状熔岩流亚相、



(a) T10 井, 3 140.71 m, 溢流相复合熔岩流亚相, 杏仁体溶蚀孔, 孔隙度 10.1%、渗透率 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; (b) Ou26 井, 2 193.50 m, 侵入相外带亚相, 角砾间溶蚀孔, 孔隙度 16.5%、渗透率 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; (c) J26 井, 3 642.45 m, 侵入相边缘亚相, 长石溶蚀孔和皂石溶蚀孔, 孔隙度 14.4%、渗透率 $3.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

图 10 东部凹陷新生界火成岩有效储集层的储集空间 (深蓝色和浅蓝色部分均为有效孔隙中注入的铸胶)

内带亚相和中心亚相在相序上位于所属岩相的下部或内部,主体上由厚层均一的致密块状火成岩构成,原生储集空间相对不发育,以冷凝收缩缝为主,岩石后期溶蚀改造程度弱。尽管在相同构造应力下,裂缝易于形成和保存,但总面孔率较低,因此这几类亚相岩石储集能力相对较差,对储集层贡献不大。

5 结论

辽河拗陷东部凹陷新生界发育粗面岩、玄武岩和辉绿岩 3 大类火成岩,具有喷出与侵入、水下与陆上并存的特点,其火成岩相包括火山通道相、爆发相、溢流相、侵出相、火山沉积相和侵入相 6 种,进一步细分为 16 类亚相。根据岩心和薄片反映的火成岩岩石成分、结构和构造等内在地质属性,结合测井相分析和地震相解译,总结出辽河拗陷新生界中基性火成岩 6 相 16 亚相的发育特征和识别标志。

此分类适用于以中基性火成岩为主的盆地埋藏火成岩相的识别和划分,可用于火成岩体内部结构刻画、火成岩储集层形成机理和分布规律的研究。相较而言,以四川、准噶尔和塔里木盆地为代表的古生界中基性火成岩受蚀变和风化作用改造的特征更为明显^[14],因此其火成岩相分析需重点对经历蚀变、风化作用改造后的原生结构和构造加以辨识。

溢流相复合熔岩流亚相、侵出相外带亚相和侵入相边缘亚相是东部凹陷新生界中基性火成岩储集层发育的有利相带。火成岩相对储集层的控制作用主要体现在原生储集空间和次生改造两方面:原生储集空间是火成岩储集层发育的必要基础条件;后期与界面相关的次生改造作用是决定储集层有效性的关键因素。

参考文献:

- [1] 王璞珺,迟元林,刘万洙,等. 松辽盆地火山岩相:类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2003,33(4):449-456.
Wang Pujun, Chi Yuanlin, Liu Wanzhu, et al. Volcanic facies of Songliao Basin: Classification, characteristics and reservoir significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2003, 33(4): 449-456.
- [2] Stewart A L, McPhie J. Facies architecture and Late Pliocene-Pleistocene evolution of a felsic volcanic island, Milos, Greece[J]. Bulletin of Volcanology, 2006, 68(7): 703-726.
- [3] Busby C J, Bassett K N. Volcanic facies architecture of an intra-arc strike-slip basin, Santa Rita Mountains, Southern Arizona[J]. Bulletin of Volcanology, 2007, 70(1): 85-103.
- [4] Fisher R V, Schmincke H U. Pyroclastic rocks[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [5] Bull K F, McPhie J. Facies architecture of the Early Devonian Ural Volcanics, New South Wales[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2006, 53(6): 919-945.
- [6] Monecke T, Gemmel J B, Herzig P M. Geology and volcanic facies architecture of the Lower Ordovician Waterloo massive sulfide deposit, Australia[J]. Economic Geology, 2006, 101(1): 179-197.
- [7] 冯子辉,邵红梅,董英. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究[J]. 地质学报,2008,82(6):760-768.
Feng Zihui, Shao Hongmei, Tong Ying. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen gas field, Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 760-768.
- [8] 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发,2008,35(3):257-271.
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [9] 黄玉龙,王璞珺,舒萍,等. 松辽盆地营城组中基性火山岩储层特征及成储机理[J]. 岩石学报,2010,26(1):82-92.
Huang Yulong, Wang Pujun, Shu Ping, et al. Characteristics and formation mechanism of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic reservoirs in Songliao Basin, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 82-92.
- [10] 陈振岩,仇劲涛,王璞珺,等. 主成盆期火山岩与油气成藏关系探讨[J]. 沉积学报,2011,29(4):798-808.
Chen Zhenyan, Qiu Jintao, Wang Pujun, et al. Relationship between volcanic rocks and hydrocarbon accumulation during dominant period of basin formation in Liaohe Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 798-808.
- [11] 蔡国刚. 辽河裂谷东部凹陷粗面岩成因机理探讨[J]. 地球学报,2010,31(2):245-250.
Cai Guogang. Genetic mechanism of trachyte in the eastern depression of Liaohe Rift[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(2): 245-250.
- [12] 吴颜雄,王璞珺,吴艳辉,等. 火山岩储集空间的构成:以松辽盆地为例[J]. 天然气工业,2011,31(4):28-33.
Wu Yanxiong, Wang Pujun, Wu Yanhui, et al. Components of volcanic reservoir space: A case study from the Songliao basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 28-33.
- [13] 罗静兰,林潼,杨知盛,等. 松辽盆地升平气田营城组火山岩相及其储集性能控制因素分析[J]. 石油与天然气地质,2008,29(6):748-757.
Luo Jinglan, Lin Tong, Yang Zhisheng, et al. Lithofacies and reservoir quality control factors of volcanics in the Yingcheng Formation in the Shengping gas field in the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 748-757.
- [14] 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.
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.

第一作者简介:黄玉龙(1982-),男,江苏六合人,博士,吉林大学地球科学学院讲师,主要从事油气储集层地质和大山地质方面的研究与教学工作。地址:吉林省长春市建设街2199号,吉林大学地球科学学院,邮政编码:130061。E-mail: long@jlu.edu.cn

收稿日期:2013-12-16 修回日期:2014-09-15

(编辑 林敏捷 绘图 刘方方)