

辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次 及其油气地质意义

冯玉辉¹, 于小健², 黄玉龙¹, 刘宝鸿³, 顾国忠³, 李涵月⁴, 王璞珺¹

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061; 2. 中国人民武装警察黄金部队第一支队, 黑龙江牡丹江 157021;
3. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010; 4. 中国石油辽河油田分公司
钻采工艺研究院, 辽宁盘锦 124010)

摘要:基于300口钻遇火山岩层系的岩心及岩屑薄片、测井和地震等资料,依据火山地层学方法及地震火山地层学理论,通过火山地层界面识别,研究辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次,对各个喷发旋回、期次火山地层进行平面成图,揭示火山活动时空规律;进一步结合火山地层分布与油气的关系,探究火山喷发旋回、期次的油气地质意义。结果表明:辽河盆地新生界火山岩系可划分为4旋回15期;底部旋回一和顶部旋回四为玄武岩,显示火山喷发以基性岩开始,又以基性岩结束;中部的旋回二和三均为玄武岩→粗面岩→玄武岩的岩性序列,构成本区火山地层的主体。火山岩受北东向主干断裂控制,最大厚度位于断裂带附近;早期(期次1至期次2)全区分布,末期(期次15)分布局限;中期(期次3至期次14)表现为喷发中心由北向南依次迁移特征。该结果提高了火山岩序列的纵向刻画精度,厘清了有利火山岩层系的空间分布,有助于寻找火山岩勘探新层系。以往辽河盆地火山岩勘探主要集中于沙三段中亚段粗面岩(期次5),本次研究发现与粗面岩相邻的期次4、期次6、期次7玄武岩亦展现出良好的油气勘探前景,为下一步勘探指明了方向。

关键词:辽河盆地; 新生界火山岩; 火山地层; 旋回; 期次

中图分类号:TE 122.222 **文献标志码:**A

引用格式:冯玉辉,于小健,黄玉龙,等. 辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次及其油气地质意义[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(5):50-57.

FENG Yuhui, YU Xiaojian, HUANG Yulong, et al. Eruption cycles and stages of Cenozoic volcanic rocks and their significance to hydrocarbon accumulations in Liaohe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(5):50-57.

Eruption cycles and stages of Cenozoic volcanic rocks and their significance to hydrocarbon accumulations in Liaohe Basin

FENG Yuhui¹, YU Xiaojian², HUANG Yulong¹, LIU Baohong³,
GU Guozhong³, LI Hanyue⁴, WANG Pujun¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Gold Headquarters of CAPF, Mudanjiang 157021, China;

3. Research Institute of Liaohe Oil Company, CNPC, Panjin 124010, China;

4. Drilling and Production Technology Research Institute of Liaohe Oil Company, CNPC, Panjin 124010, China)

Abstract: The volcanic cycles and stages in the eastern sag of Liaohe Basin were studied to identify interfaces inside the Cenozoic volcanic formations using volcano-stratigraphic methods and seismic volcano-stratigraphy theories. Drilling cores and thin

收稿日期:2015-02-12

基金项目:国家“973”计划项目(2012CB822002);国家自然科学基金项目(41472304,41202085);中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2012E-3001)

作者简介:冯玉辉(1987-),男,博士研究生,研究方向为火成岩与油气地质-地球物理。E-mail: here2009feng@126.com。

通讯作者:黄玉龙(1982-),男,讲师,博士,研究方向为火成岩与油气地质。E-mail: long@jlu.edu.cn。

sections from 300 wells were analyzed and interpreted by combining well loggings and seismic profiles. The spatial distribution of volcanic activities was revealed by mapping the volcanic formations of each cycle and stage. The relationship between oil and gas bearing layers and volcanic formations was analyzed to discuss the significance of volcanic cycles and stages to hydrocarbon accumulations. The results suggest that the Cenozoic volcanic formation in the Liaohe Basin is divided into 4 cycles and 15 stages. The 1st cycle at the bottom and the 4th cycle at the top are composed of basalts, which indicates that the Cenozoic volcanic activities began and ended with mafic magmas. The Cenozoic volcanic formation is dominated in the 2nd and 3rd cycle, and these two cycles show the same lithologic sequence from basalt to trachyte to basalt. The distribution of volcanic rocks is controlled by major faults of northeast orientations, and the maximum thickness of volcanic rocks is mainly along the fault zone. Volcanic rocks in the early stage 1 and stage 2 were widely spread in the whole sag, while the basalts in the final stage 15 are limited, and the distribution center of volcanic rocks from stage 3 to stage 14 migrated from north to south. By means of division and correlation of the volcanic sequences, the spatial distribution of the favorable volcanic stages is revealed in order to discover new hydrocarbon bearing volcanic formations for the future exploration. Previous targets are primarily on the trachytes of stage 5 in the 3rd Member of Shahejie Formation, however significant hydrocarbon accumulations have been also found recently in the basalts of the adjacent stage 4, stage 6 and stage 7, suggesting a promising future exploration in this area.

Keywords: Liaohe Basin; the Cenozoic volcanic rocks; volcano-stratigraphy; cycles; stages

火山岩作为盆地充填序列的重要组成部分,已逐渐成国内外油气勘探的重要领域,其中中国松辽、准噶尔和辽河等盆地火山岩均已显示出良好的勘探前景^[1-3]。火山岩油气勘探的首要任务是寻找火山岩储层,而火山岩储层刻画与对比需要在火山地层格架约束下进行,因此在进行火山岩油气藏勘探时首先需要建立火山地层格架^[4]。辽河盆地现有的火山地层格架主要是依据年代学资料建立的^[5],存在两方面问题:一方面,年代学方法受样品位置、样品数量以及测试误差等方面的限制较大;另一方面,火山地层与沉积地层间互产出^[6-7],沉积界面较多,且受后期构造改造作用较强^[8-9],仅以年代学资料划分的火山地层与火山地层追踪和对比的尺度不相匹配。此外,国内外现有的火山旋回、期次分析与识别主要限定于地层组段之内,而辽河盆地火山岩分布于整个新生界地层中,且多与沉积地层互层产出,由于划分尺度不同,不能完全依据现有的识别方法^[10-11]。笔者以300口钻遇火山岩层系的钻井的岩心及岩屑薄片、测井曲线和三维地震等资料为基础,依据火山地层学方法及地震火山地层学理论,通过火山地层界面识别,研究辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次;并在此基础上研究火山活动时空规律,阐述火山喷发旋回、期次的油气地质意义。

1 火山喷发旋回和期次划分识别原理

划分火山喷发旋回与期次的核心是识别火山地层界面。本文中涉及到的火山地层界面有不整合面、沉积夹层、岩性组合和岩相组合突变面4种。其中不整合面是旋回界面,后3种为期次界面。

1.1 不整合面

由于盆地内火山活动通常发生在引张构造应力场背景下,当盆地所处的引张构造应力场发生改变时可能造成火山活动减弱直至停止,反映了火山喷发旋回的结束;同时也会造成盆地构造沉降的停止乃至抬升,使地层不接受沉积或遭受剥蚀,形成不整合面,因此不整合面可以反映火山喷发旋回的结束。不整合面包括角度不整合面和平行不整合面两种。角度不整合界面主要通过地震剖面识别,界面在地震剖面上以下部地层被上部地层削截为特征,在岩性剖面上界面上下地层岩性组合可能存在差别(图1);平行不整合主要依据年代学资料以及古生物资料,通过地层年代以及古生物自然记录的间断来识别,其在地震剖面以及岩性剖面上均不易识别。

1.2 沉积夹层

辽河盆地新生界火山地层具有与沉积地层互层产出的特点,仅以沉积地层来识别火山期次具有一定困难。本文中在单井、地质连井以及地震连井对比分析的基础上,依据沉积地层厚度、侧向连续性等特征,将辽河盆地沉积地层划分为标志性沉积地层和非标志性沉积地层两种。标志性沉积地层以沉积厚度相对较大,厚度通常上百米,侧向连续性好,区域性稳定沉积为特征,可以作为火山期次划分的标志层;非标志性沉积地层以沉积厚度相对小,侧向连续性差,分布较局限,岩性以砂岩为特征,多以薄层夹于火山地层之中,通常不能作为火山期次划分的标志层(图2)。另外,不同钻井由于位置不同,导致揭示标志性沉积地层厚度变化较大,局部地区甚至不发育,这时需要利用地震资料,通过地层对比,利

用标志性沉积地层厚度较大的井标定标志性沉积地 层厚度较小或不发育的井。

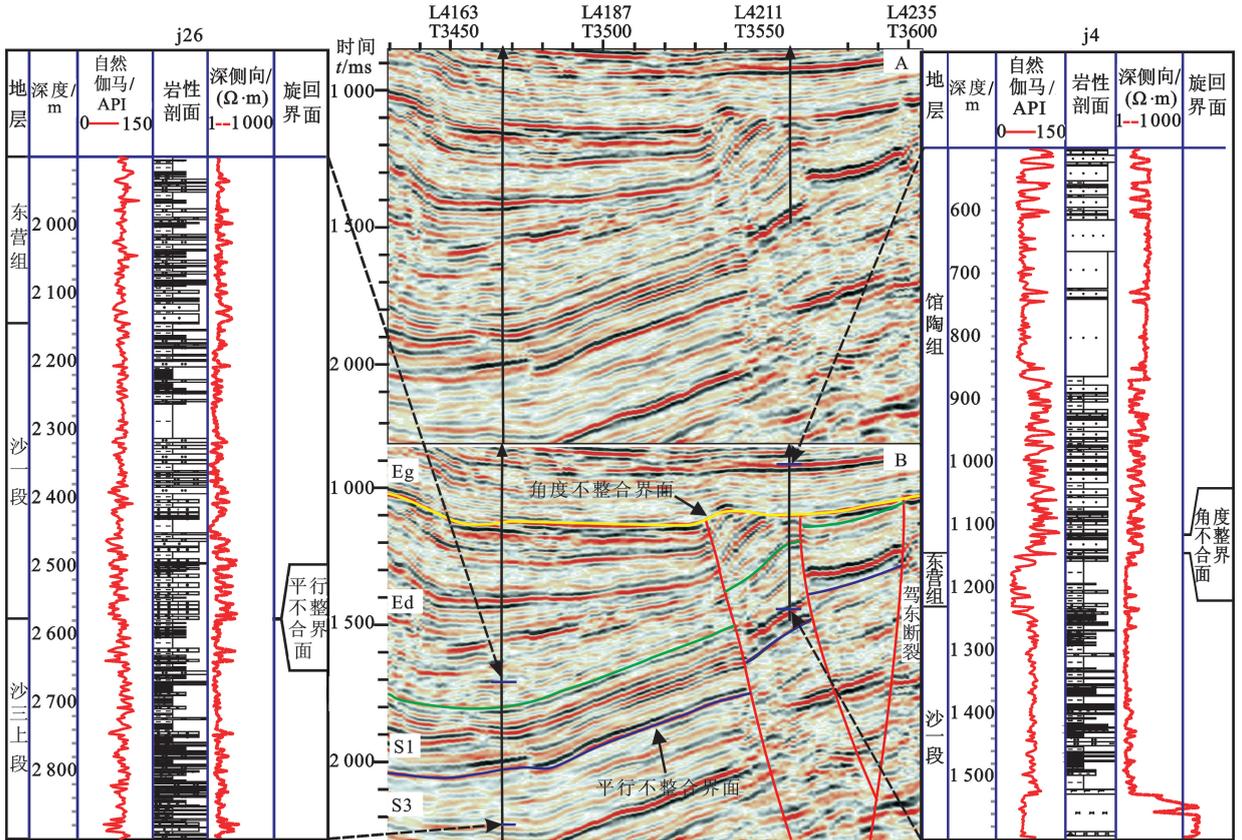


图1 旋回不整合面划分依据

Fig. 1 Identifying volcanic cycles by unconformity surface

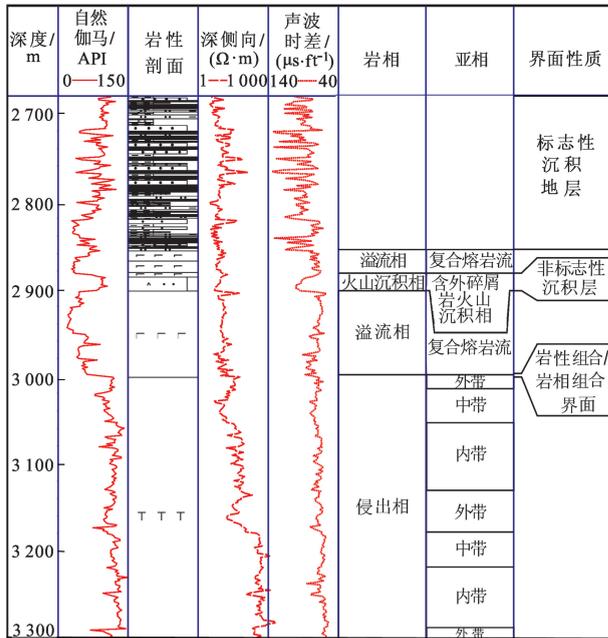


图2 期次划分依据

Fig. 2 Identifying volcanic stages

1.3 岩性组合突变界面

火山活动通常表现出周期性的变化,包括喷出的物质成分、喷发强度和喷出熔岩厚度的变化等。

同一期次内部岩性构成常见以下几种情况:①以熔岩为主,对其可以依据成分划分;②熔岩与(火山)沉积岩互层,期次内部岩性构成一般下部为熔岩、上部为火山沉积岩;③熔岩与火山碎屑(熔)岩互层,期次内部岩性构成一般下部为火山碎屑(熔)岩、上部为熔岩;④熔岩、火山碎屑岩、沉积岩交替互层,期次内部岩性构成一般为火山碎屑(熔)岩—熔岩—沉积岩。以上只是一般规律,实际情况要相对复杂得多,如在一个相对较短的时期内,若火山作用频繁,则一个期次可以形成多个上述完整序列,或者形成多个不完全序列。

1.4 岩相组合突变界面

一个完整的火山岩相序组合在纵向上表现为爆发相—侵出相—喷溢相—火山沉积相^[12],其中火山通道相通常由于钻井揭示火山机构位置不同,可位于爆发相、溢流相、侵出相之间任意位置。由于中基性岩石岩浆黏度不同,因此具有不同的相序特征,中性岩相序特征以(火山通道相→)爆发相→侵出相→溢流相→火山沉积相为特征,基性岩以(火山通道相→)(爆发相→)溢流相→火山沉积相为特征,以上只是理想模式,实际情况中相序组合往往可能

只出现其中的 2~3 种岩相类型,亦可为单一的岩相类型,还可能出现相序颠倒的情况。通常一个火山期次包含一个或多个这样的相序组,但相同期次内相序组具有一定的相似性。

2 火山喷发旋回和期次划分

依据地层界面的识别,将辽河盆地新生界火山地层划分为 4 旋回、15 期次(图 3)。辽河盆地新生

界火山地层内部共识别出 3 个不整合界面,划分为 4 个旋回,其中旋回一与旋回二、旋回二与旋回三之间为平行不整合界面,旋回三与旋回四之间为角度不整合界面。旋回一和旋回四为基性火山旋回,显示该地区新生界火山岩以基性岩开始,并以基性岩结束。旋回二和旋回三为基性—中性—基性火山旋回,显示该区中部火山岩演化具有基性→中性偏碱性→基性的特点。

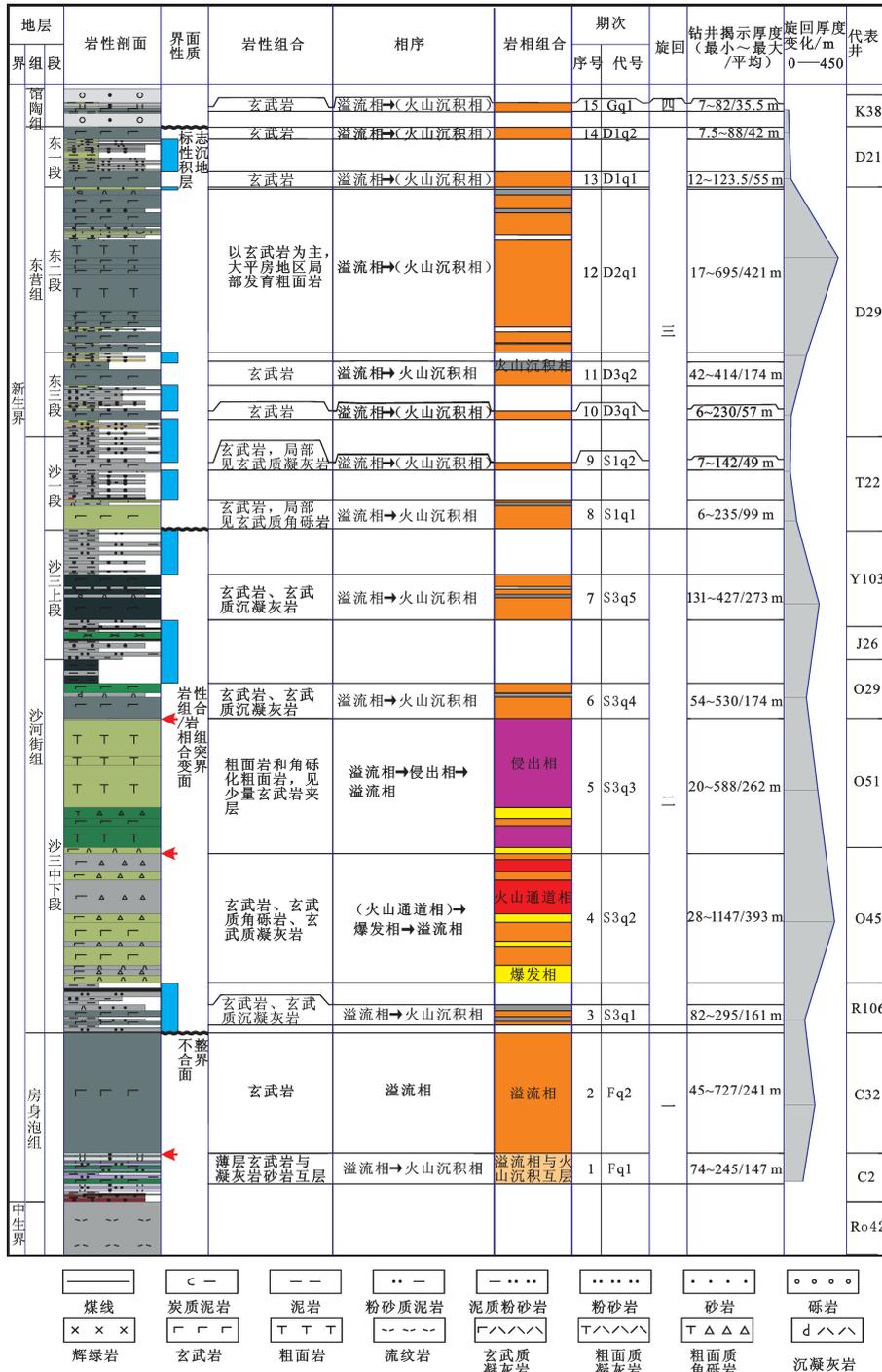


图 3 辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次划分

Fig. 3 Identification of Cenozoic volcanic cycles and stages in Liaohe Basin

旋回一主要发育在房身泡组时期,内部共识别出1个期次界面,为岩性组合/岩相组合突变界面,共划分为2个喷发期次(期次1~2)。期次内部相序主要为溢流相(→火山沉积相)。期次1,岩性以玄武岩为主,相序主要发育溢流相→火山沉积相,整体以溢流相玄武岩与(火山)沉积岩薄层互层为特征;期次2,岩性以玄武岩为主,相序为溢流相,整体以厚层溢流相玄武岩为特征。火山喷发强度演化方向为期次1(中等)→2(强)。

旋回二主要发育在沙三时期,内部共识别出4个期次界面,期次3和4、期次6和7间为沉积夹层界面(标志性沉积地层),期次4和5、期次5和6之间为岩性组合/岩相组合突变界面,共划分为5个喷发期次(期次3~7)。其中期次3和4、期次6和7之间的标志性沉积地层主要为厚层暗色泥岩沉积,有时可见煤层。期次3、4、6、7为基性岩期次,期次5为中性岩期次,其中基性岩期次3、6、7岩性以玄武岩为主,相序主要发育(爆发相→)溢流相(→火山沉积相),期次4岩性以角砾化玄武岩以及玄武质火山碎屑岩为主,相序主要发育爆发相→溢流相(→火山沉积相);中性岩期次5岩性以角砾化粗面岩、粗面质火山碎屑岩为主,相序主要发育爆发相→侵出相(→火山沉积相),一个期次通常包括一个或多个相序组。整体上,期次3、7以溢流相玄武岩与(火山)沉积岩薄层互层为特征,期次4以厚层爆发相和溢流相玄武质岩石互层为特征,期次5以爆发相和侵出相粗面质岩石互层为特征,期次6以厚层溢流相玄武岩夹薄层沉积地层为特征。火山喷发强度演化方向为期次3(弱)→4(强)→5(强)→6(较强)→7(中等)。

旋回三主要发育在沙一和东营时期,内部共识别出6个期次界面,均是沉积夹层界面(标志性沉积地层),共划分为7个喷发期次(期次8~14)。各期次之间的标志性沉积地层主要为厚层砂泥岩互层沉积。期次12为基性+中性期次,其余的均为基性期次,基性期次岩性以玄武岩为主,期次8~9局部地区见少量玄武质火山碎屑岩,相序主要发育(爆发相→)溢流相(→火山沉积相);基性+中性期次岩性以玄武岩为主,仅局部钻井(D28、D29井)中夹有粗面岩,相序主要发育溢流相(→火山沉积相),一个期次通常包括一个或多个相序组。整体上,期次8~9以溢流相薄层玄武岩与(火山)沉积岩薄层互层为特征,期次10、11、13、14以薄层溢流相玄武岩为特征,期次12以厚层溢流相玄武岩与厚层溢流相粗面岩互层为特征,并夹有薄层(火山)沉积地层。火山喷发强度演化方向为期次8(弱)→9(较弱)→10(弱)→11(较强)→12(强)→13(弱)→14(弱)。

旋回四主要发育在馆陶时期,仅发育1个喷发期次(期次15)。期次15为基性期次,岩性以玄武岩为主,相序主要发育溢流相(→火山沉积相),整体以溢流相玄武岩与(火山)沉积岩薄层互层为特征。旋回四虽然在凹陷内只有很弱的一期火山地层发育,但在盆缘地区发育较广,山东昌乐等地区广泛分布该期火山地层^[13],因此有必要将其单独归为一个旋回。

3 研究意义

3.1 新生界火山岩分布规律

在火山岩旋回和期次划分的基础上,依据钻井揭示的火山岩厚度,探讨东部凹陷中南段新生界火山岩分布规律(图4)。由图4可知,东部凹陷火山岩分布总体受走滑断裂控制,厚度中心具有分布在断裂带附近的特征。各个旋回期次分布特征如下:旋回一期次1~2火山岩全区均有分布,目前仅凹陷两侧有钻井揭示,依据地震资料预测^[14],该期覆盖了整个东部凹陷,厚度中心不明显。旋回二期次3~7火山岩分布范围呈由北向南迁移的特征,厚度中心呈由南北向中心迁移的特征,全区均有分布;旋回三期次8~14火山岩分布范围呈由北向南迁移的特征,厚度中心呈由北向南迁移的特征,主要分布在中—南部地区;旋回四期次15火山岩主要分布在南部地区,分布范围局限。总体来看,东部凹陷中南段新生界火山岩分布范围呈现早期(期次1~2)全区分布,后期(期次4~15)由北向南的迁移特征,而火山岩厚度中心早期(期次1~7)由南北两端向中心迁移,后期(期次7~15)由中心向南迁移。

3.2 火山岩分布与油气的关系

一方面,不同期次火山岩发育规模和平面分布范围控制着有利火山岩体的分布规律。另一方面,不同期次的岩性和岩相构成存在差异,各期次是否发育储集能力相对较好的优势岩相和亚相与其所占比例以及对储层的贡献大小综合决定了该期次火成岩的储集性能^[15-16]。东部凹陷新生界储层优势亚相主要包括火山通道相火山颈亚相、爆发相火山碎屑流亚相、溢流相复合熔岩流亚相和玻璃质碎屑岩亚相、侵出相外带亚相和中带亚相^[16-18],结合各期次火成岩相和亚相发育规律,初步分析储集性能相对较好的期次,主要包括期次1~2、4~7、11~13。通常火山岩和沉积岩物性特征与埋深存在一定的规律,当埋深小于2500m时,沉积岩物性好于火山岩,当埋深位于2500~3000m时,两者物性相当,当埋深大于3000m时,火山岩物性稍好^[19]。综合考虑埋藏深度以及与沉积岩储集物性对比,目前有

利于成藏的层系主要为期次 1~2、4~7。东营组尽管气孔玄武岩极为发育,储集物性优越,但与同层系纵向相邻井段的沉积岩相比较,其物性,尤其渗透率

明显低于沉积岩,因此东营组玄武岩可为碎屑岩提供局部盖层条件(图 5)。

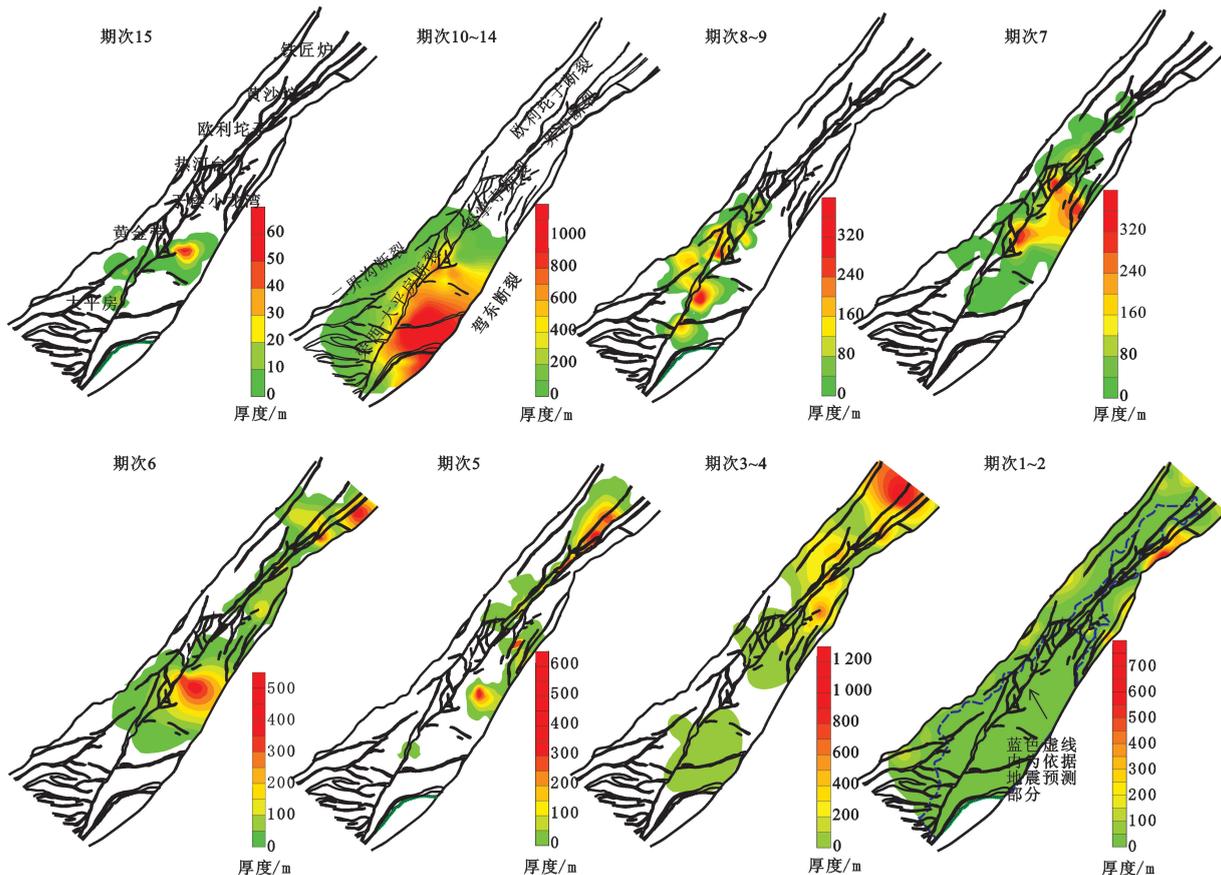


图 4 辽河盆地东部凹陷各期次火山岩厚度分布

Fig. 4 Volcanic thickness distribution map of each stage in eastern depression of Liaohe Basin

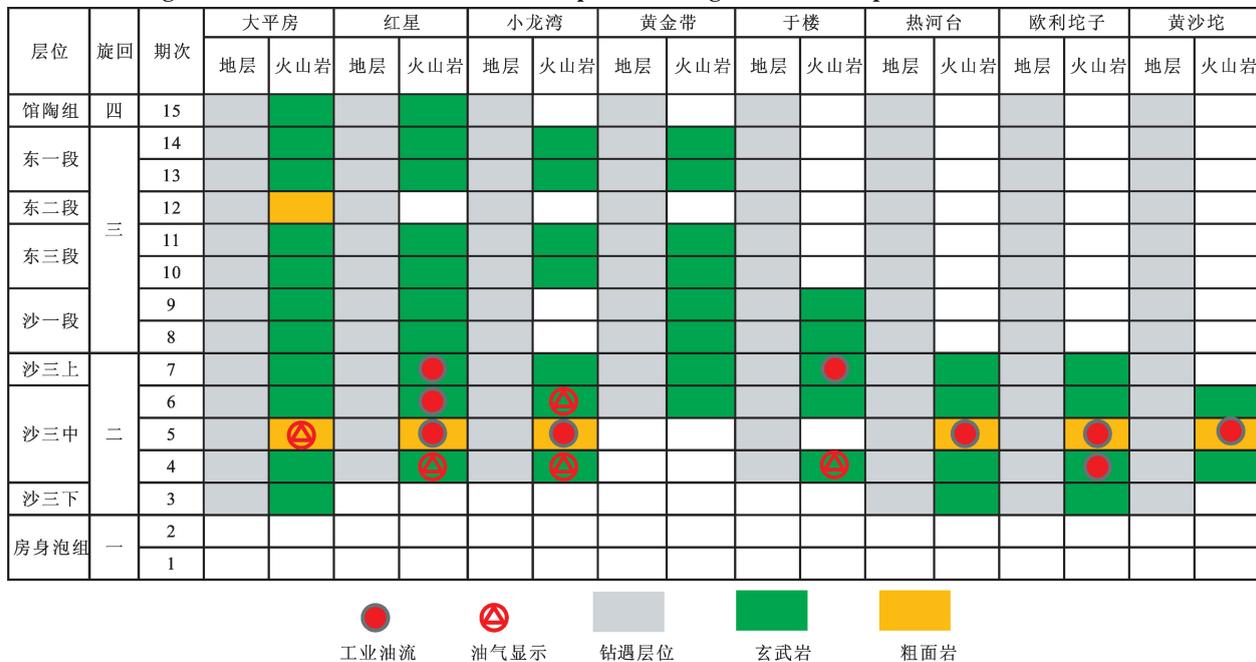


图 5 火山地层分布与油气关系

Fig. 5 Relationship between volcanic formation and hydrocarbon accumulations

3.3 勘探新层系和油气发现

以往东部凹陷火山岩勘探主要目标为沙三段粗面岩(期次5),并且截止到2005年,已上报 2689×10^4 t的探明石油地质储量^[20]。随着钻井的增多,在沙三段粗面岩上下邻近的火山地层中也见有良好的油气显示,通过对凹陷内火山地层研究,将与粗面岩相邻的火山岩地层进行了期次划分,分别为期次4、6、7,并填制了各个期次火山岩平面分布图,揭示了各个期次火山岩的空间展布。近3年来,依据本文中研究结果,以沙三期次4~7为目的层共部署并完钻的14口探井中,有6口探井获得工业油气,并在期次6和7中玄武岩中也发现工业油气(图6),目前期次4、6、7也成为本区火山岩勘探的重点领域。

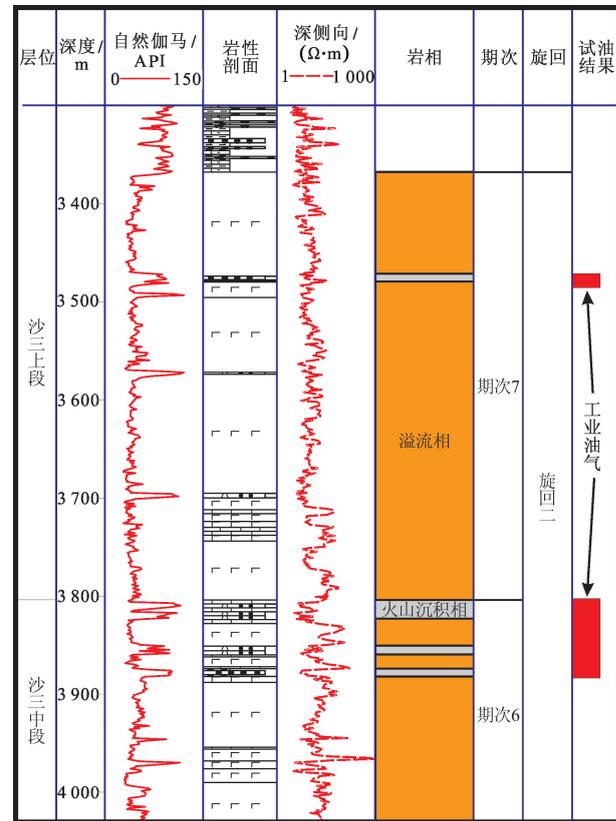


图6 旋回二期次6~7新发现油气分布

Fig.6 Distribution of oil and gas in volcanic stages 6 and 7 of cycle 2

4 结论

(1)依据4类界面分出4旋回15期火山岩。旋回1和旋回4为基性旋回,旋回2和旋回3为基性—中性—基性旋回。火山喷发强度在旋回2和3两个旋回的中部最大。

(2)纵向旋回期次的详细划分揭示出火山岩时空发育规律性。东部凹陷中南段新生界火山岩分布范围呈现早期(期次1~2)全区分布,后期(期次2

~15)由北向南的迁移特征,而火山岩厚度中心呈早期(期次1~7)由南北两端向中心迁移,后期(期次7~15)由南略向北迁移的特征。

(3)纵向旋回期次刻画精度提高促进了火山岩油气新层系的发现。以往本区火山岩勘探主要为沙三中段粗面岩(期次5),通过火山岩旋回和期次的划分,发现与粗面岩相邻的期次4、6、7玄武岩期次也是重点勘探领域,近期已在期次6和7玄武岩中发现了工业油气。

参考文献:

[1] 刘嘉麒,孟凡超,崔岩,等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报,2010,26(1):1-13.
LIU Jiaqi, MENG Fanchao, CUI Yan, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(1):1-13.

[2] 王伟锋,高斌,卫平生,等. 火山岩油气藏地球物理预测技术及准噶尔勘探实例[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(6):33-39.
WANG Weifeng, GAO Bin, WEI Pingsheng, et al. Geophysical prediction technologies for volcanic reservoirs and exploration case in Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012,36(6):33-39.

[3] 曲江秀,高长海,查明,等. 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系火山岩储层特征及成岩演化[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(5):1-8.
QU Jiangxiu, GAO Changhai, ZHA Ming, et al. Reservoir characteristics and diagenetic evolution of Carboniferous volcanic rock in Kelameili gas field of Junggar Basin. [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(5):1-8.

[4] 黄玉龙,王璞珺,门广田,等. 松辽盆地营城组火山岩旋回和期次划分:以盆缘剖面和盆内钻井为例[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2007,37(6):1183-1191.
HUANG Yulong, WANG Pujun, MENG Guangtian, et al. Division of volcanic cycles and stages of the Yingcheng formation of the Songliao Basin-take the cross sections at the margin and the boring holes as examples [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007,37(6):1183-1191.

[5] 梁鸿德,申绍文,刘香婷,等. 辽河断陷火山岩地质年龄及地层时代[J]. 石油学报,1992,13(2):35-41.
LIANG Hongde, SHEN Shaowen, LIU Xiangting, et al. The age of the volcanic rocks and their geological time in Liaohe depression[J]. Acta Petrologica Sinica, 1992,13(2):35-41.

[6] CHEN Zhenyan, HUO Yan, LI Junsheng, et al. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China [J].

- AAPG Bulletin, 1999, 83(6):1004-1014.
- [7] LUO Jinglan, SADOON Morad, LIANG Zhigang, et al. Controls on the Archeozoic-Jurassic Metamorphic-Volcanic reservoir quality from the Xinglongtai buried hill, Western Depression of Liaohe Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(10):1319-1346.
- [8] 李思伟,王璞珺,丁秀春,等. 辽河东部凹陷走滑构造及其与火山岩分布的关系[J]. 地质论评, 2014, 60(3):591-600.
- LI Siwei, WANG Pujun, DING Xiuchun, et al. The relationship of strike-slip belts and volcanic rocks distribution in the eastern depression Liaohe Basin [J]. Geological Review, 2014, 60(3):591-600.
- [9] 赵海玲,邓晋福,陈发景,等. 东北地区新生代火山作用,深部作用与大陆裂谷型[J]. 地球科学, 1996, 21(6):615-619.
- ZHAO Hailing, DENG Jinfu, CHEN Fajing, et al. Cenozoic volcanism, deep interior processes and continental rift basin formation in the northeastern China [J]. Earth Science, 1996, 21(6):615-619.
- [10] 唐华风,孙海波,高有峰,等. 火山地层界面的类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2013, 43(5):1320-1329.
- TANG Huafeng, SUN Haibo, GAO Youfeng, et al. Types and characteristics of volcano stratigraphic boundary and its signification of reservoirs. [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5):1320-1329.
- [11] 瞿雪姣,王璞珺,姚瑞士,等. 松辽盆地南部火石岭组地层序列划分与区域对比[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(8):2716-2727.
- QU Xuejiao, WANG Pujun, YAO Ruishi, et al. Stratigraphical sequence and regional correlation of Huoshiling Formation in southern Songliao Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(8):2716-2727.
- [12] 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 the Songliao Basin: classification, characteristics and reservoir significance [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(4):449-456.
- [13] 田海芹,马玉新,于文芹,等. 山东昌乐-临朐火山岩孔隙系统研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(2):174-182.
- TIAN Haiqin, MA Yuxin, YU Wenqin, et al. Studies on the fracture systems in the volcanic rocks, Changle-Lin region, Shandong [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(2):174-182.
- [14] 冯玉辉,黄玉龙,丁秀春,等. 辽河盆地东部凹陷中基性火山岩相地震响应特征及其机理探讨[J]. 石油物探, 2014, 53(2):206-215.
- FENG Yuhui, HUANG Yulong, DING Xiuchun, et al. Relationship between intermediate-mafic volcanic facies and their corresponding seismic reflections: a case study from eastern depression of Liaohe Basin, NE China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(2):206-215.
- [15] 黄玉龙,单俊峰,边伟华,等. 辽河拗陷中基性火成岩相分类及储集意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6):671-680.
- HUANG Yulong, SHAN Junfeng, BIAN Weihua, et al. Facies classification and reservoir significance of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Liaohe Depression, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6):671-680.
- [16] 王岩泉,胡大千,蔡国刚,等. 辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素[J]. 石油学报, 2013, 34(5):896-904.
- WANG Yanquan, HU Daqian, CAI Guogang, et al. Characteristics and controlling factors of Cenozoic volcanic reservoir in Liaohe Basin, NE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(5):896-904.
- [17] 赵海玲,李小光,陈振岩,等. 辽河油田坨32井区中生界火山岩岩石学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4):549-556.
- ZHAO Hailing, LI Xiaoguang, CHEN Zhenyan, et al. Petrology and genesis of Mesozoic volcanic rocks in Tuo32 well block of Liaohe Oilfield [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(4):549-556.
- [18] 于小健,黄玉龙,李军,等. 辽河盆地东部凹陷古近系沙三段粗面岩成因及喷发模式[J]. 中国矿业, 2013, 22(3):58-65.
- YU Xiaojian, HUANG Yulong, LI Jun, et al. Lithogenesis and eruption model of the eocene trachyte in eastern sag of Liaohe Basin [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(3):58-65.
- [19] WANG Pujun, CHEN Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3):499-523.
- [20] 张占文,陈振岩,蔡国刚,等. 辽河拗陷火成岩油气藏勘探[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(4):16-22.
- ZHANG Zhanwen, CHEN Zhenyan, CAI Guogang, et al. Exploraion of volcanic oil and gas reservoirs in Liaohe depression [J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(4):16-22.