

文章编号: 1004-5589 (2016) 01-0235-09

辽河盆地东部凹陷古近系玄武岩岩石学特征 及其测井响应

杨凯凯¹, 边伟华¹, 缴洋洋¹, 周旭红², 徐琛琛², 卢忠琼³

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 中国石油 辽河油田分公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010;
3. 中国石油华北油田二连分公司 地质研究所, 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要: 根据辽河盆地东部凹陷 45 口钻井的 305.79 m 玄武岩岩芯、176 个岩芯薄片和其对应井段的测井资料, 将东部凹陷玄武岩分为致密玄武岩、气孔玄武岩和角砾化玄武岩等 3 类。致密玄武岩呈致密块状, 蚀变程度低, 测井响应以高密度 (平均值为 $2.71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、低自然伽马 (平均值为 36 API) 为特征; 气孔玄武岩气孔发育, 多被沸石、方解石等充填, 蚀变程度最高, 测井响应以低密度 (平均值为 $2.47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、高声波时差 (平均值为 $72 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$) 为特征; 角砾化玄武岩呈自碎角砾状, 发育角砾间孔, 测井响应以低电阻率 (平均值为 $8 \Omega \cdot \text{m}$) 为特征。这 3 种玄武岩的测井响应机理与其矿物组成、结构构造、蚀变类型及程度、孔缝发育程度及后期充填改造、流体类型等密切相关。

关键词: 辽河盆地; 东部凹陷; 玄武岩; 岩石学特征; 测井响应特征

中图分类号: P588.145; P631.322 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.01.024

Petrological characteristics and logging response of Paleogene basalts in eastern depression of Liaohe Basin

YANG Kai-kai¹, BIAN Wei-hua¹, JIAO Yang-yang¹, ZHOU Xu-hong², XU Chen-chen², LU Zhong-qiong³

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. Research Institute of Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, Liaoning, China;
3. Geology Research Institute, Erlian Branch, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Xilinhaote 026000, Inner Mongolia, China

Abstract: Based on the basalt cores of 305.79 m long, 176 rock slides and their corresponding logging data of 45 wells in the eastern depression of Liaohe Basin, the basalts are divided into the massive, vesicular and brecciated basalts in category. The massive basalt is dense and massive, underwent a low degree of alteration, and its logging is characterized by high density (in average of $2.71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) and low natural gamma (in average of 36 API). The vesicular basalt is developed in vesicles, mostly filled with zeolite and calcite, underwent the most serious alteration, and its logging is characterized by low density (in average of $2.47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) and high acoustic time (in average of $72 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$). The brecciated basalt is in autobrecciated form, developed in inter-breccia spaces, and its logging is characterized by low resistivity (in average of $8 \Omega \cdot \text{m}$). The mechanisms of well-logging response of the basalts depend on mineral composition, structure, alteration type and degree, reservoir space and later modification, and hydrocarbon saturation, etc.

Key words: Liaohe Basin; eastern depression; basalt; petrological characteristics; logging response

收稿日期: 2015-10-27; 改回日期: 2015-12-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB822002), 国家自然科学基金青年基金项目(41002038)和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)联合资助。

通讯作者: 边伟华(1976-), 男, 讲师, 主要从事盆地火山岩和油气地质方面的研究。E-mail: WeihuaBian@jlu.edu.cn

0 引言

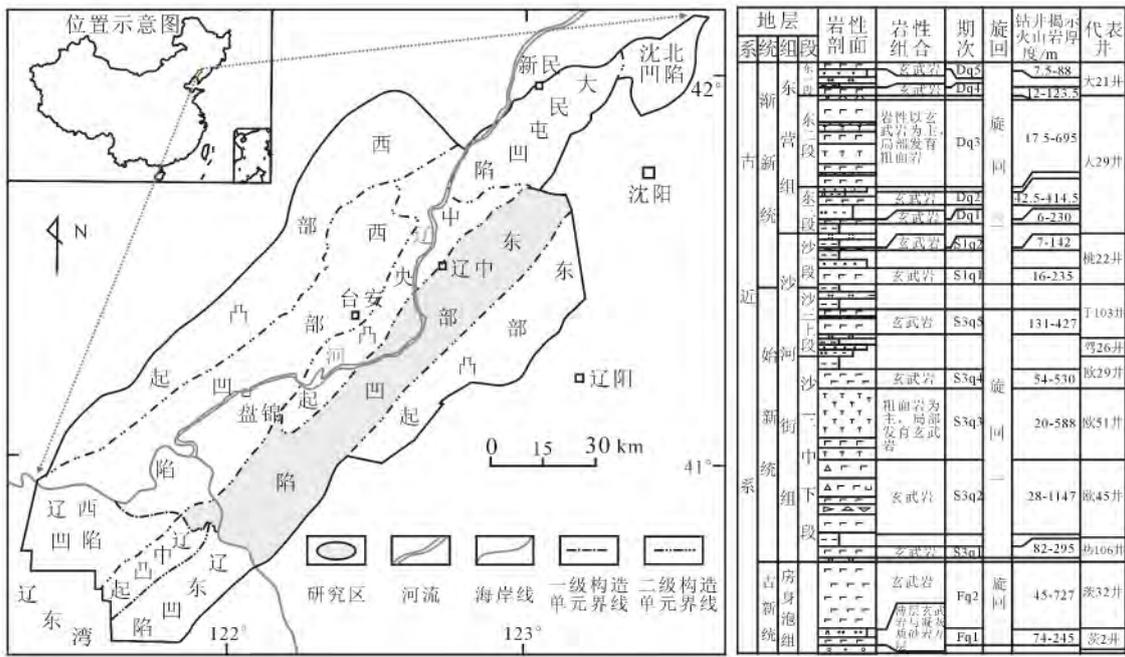
辽河盆地东部凹陷自中生代以来，长期作为辽河盆地内岩浆活动中心区域^[1]，火成岩发育广泛。辽河盆地火山岩油气藏发现较早，1971年首次在东部凹陷的热24井安山岩中获高产工业油气流。此后，东部凹陷一直是辽河盆地火山岩油藏勘探开发的重点地区^[2,3]。东部凹陷火山岩储层岩性以粗面岩和辉绿岩为主^[4-7]，近年来，随着驾31等井玄武岩中工业性油流的发现，玄武岩油藏引起了更多关注^[8]。东部凹陷玄武岩地层以厚层熔岩为特征，最大厚度可达数百米，现有的岩芯与岩屑等地质资料无法满足储层研究需求，而地震资料分辨率过粗，从而对测井资料的需求凸显，一些学者应用测井资料开展火山岩岩性识别、储层评价以及井震结合开展火山储层分布规律的研究，并取得了大量的成果^[9-15]。本文以辽河盆地东部凹陷45口钻井的305.79 m玄武岩岩芯、176个岩芯薄片及对应的测井数据为基础，将本区玄武岩分为致密、气孔和角砾化玄武岩3类，同时确定了其岩石学特征和测井

响应特征，分析了不同类型玄武岩的测井响应机理，为后续区域玄武岩油气藏的勘探提供一定的参考。

1 地质概况

辽河盆地位于华北板块东北缘，渤海湾盆地北端，是中、新生代发育起来的裂谷型盆地^[16]。盆地呈北东向狭长状展布，共划分为辽河拗陷和辽东湾拗陷等2个一级构造单元^[17]。本文研究区域为辽河拗陷的东部凹陷，可进一步划分为4个凹陷、3个凸起等7个二级构造单元（图1a）。

辽河盆地中—新生代火山岩活动具有明显的旋回性和周期性^[18]。在辽河拗陷的3大凹陷中，东部凹陷火山活动最为强烈，活动期次多、延续时间长、火成岩分布广泛^[19]。其古近系火山岩可以划分为3个喷发旋回，14个喷发期次，从房身泡组到东营组各个组段均有火山岩发育。岩性类型以中基性火山熔岩为主，部分层位发育中基性火山碎屑岩（图1b）。



a. 研究区位置及构造单元; b. 古近系地层序列

图1 辽河盆地东部凹陷地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of eastern depression of Liaohe Basin

2 玄武岩的岩石学特征

玄武岩为基性火山熔岩, SiO_2 含量为 45% ~ 52%, 岩石色率普遍较高, 东部凹陷玄武岩厚度约占火成岩总厚度的 42%^[20], 根据对 45 口钻井的 305.79 m 玄武岩岩芯、176 个岩芯薄片的观察, 东部凹陷玄武岩常见颜色主要为灰黑色和灰绿色, 风化面为紫红或深褐色。多为半晶质结构, 具有斑状结构, 基质为间粒结构、间隐结构等。斑晶主要为基性斜长石、单斜辉石、斜方辉石和橄榄石等。常见块状构造、气孔杏仁构造, 杏仁体主要为沸石、硅质和钙质等充填气孔形成。根据其成岩环境、斑晶含量、基质结构、特征结构构造和储层意义等, 将玄武岩进一步划分为以下 3 类:

致密玄武岩: 灰黑色, 致密块状, 结晶程度较好, 气孔不发育, 可见裂缝 (图 2a), 裂缝被方解石、沸石或皂石部分或全部充填 (图 2g、h)。斑状结构, 斑晶斜长石、辉石、橄榄石, 整体蚀变程度较低 (图 2b), 常见的蚀变类型主要有皂石化、绿泥石化、沸石化、黏土矿化, 橄榄石通常蚀变为皂石 (图 2i)、伊丁石 (图 2j), 亦可见析铁暗化 (图 2k), 部分矿物全部蚀变, 只保留晶形 (图 2i); 辉石蚀变程度较橄榄石弱, 通常较新鲜, 但亦可见蚀变为皂石、绿泥石 (图 2l) 的现象; 斜长石多部分或全部皂石化 (图 2i、m)、黏土化 (图 2n) 或绿泥石化 (图 2n), 部分呈现出环带状 (图 2m) 或筛孔状 (图 2n) 蚀变的特征。

气孔 (杏仁) 玄武岩: 灰黑色, 气孔发育, 多被充填, 形成杏仁体 (图 2c), 充填物多为方解石 (图 2p)、绿泥石 (图 2p)、沸石 (图 2d) 和皂石。结晶程度较致密玄武岩差 (图 2d)。蚀变程

度较高, 多整体皂石化 (图 2d), 部分岩芯蚀变严重呈灰绿色, 呈现出“泥质岩”的特征 (图 2o), 薄片观察可见基质整体呈黄绿色, 已经全部皂石化 (图 2d), 致密玄武岩具有的蚀变类型在气孔玄武岩中均可找到, 除此之外还可见斜长石斑晶沸石化 (图 2d) 的现象。

角砾化玄武岩: 灰黑色, 呈自碎角砾状 (图 2e), 是炽热的玄武质岩浆遇水急速淬火冷却而炸裂形成的。岩石中角砾间孔和裂隙发育 (图 2e), 孔壁可见玻璃质反应边 (图 2f), 孔隙多未被充填, 局部可见钙质或硅质充填。结晶程度较低, 角砾呈玻基斑状结构 (图 2f), 斑晶为橄榄石和斜长石, 基质已脱玻化呈隐晶质, 皂石化明显 (图 2f)。斜长石全部蚀变为沸石, 只保留晶形, 橄榄石则蚀变为皂石 (图 2f)。

3 玄武岩的测井响应特征

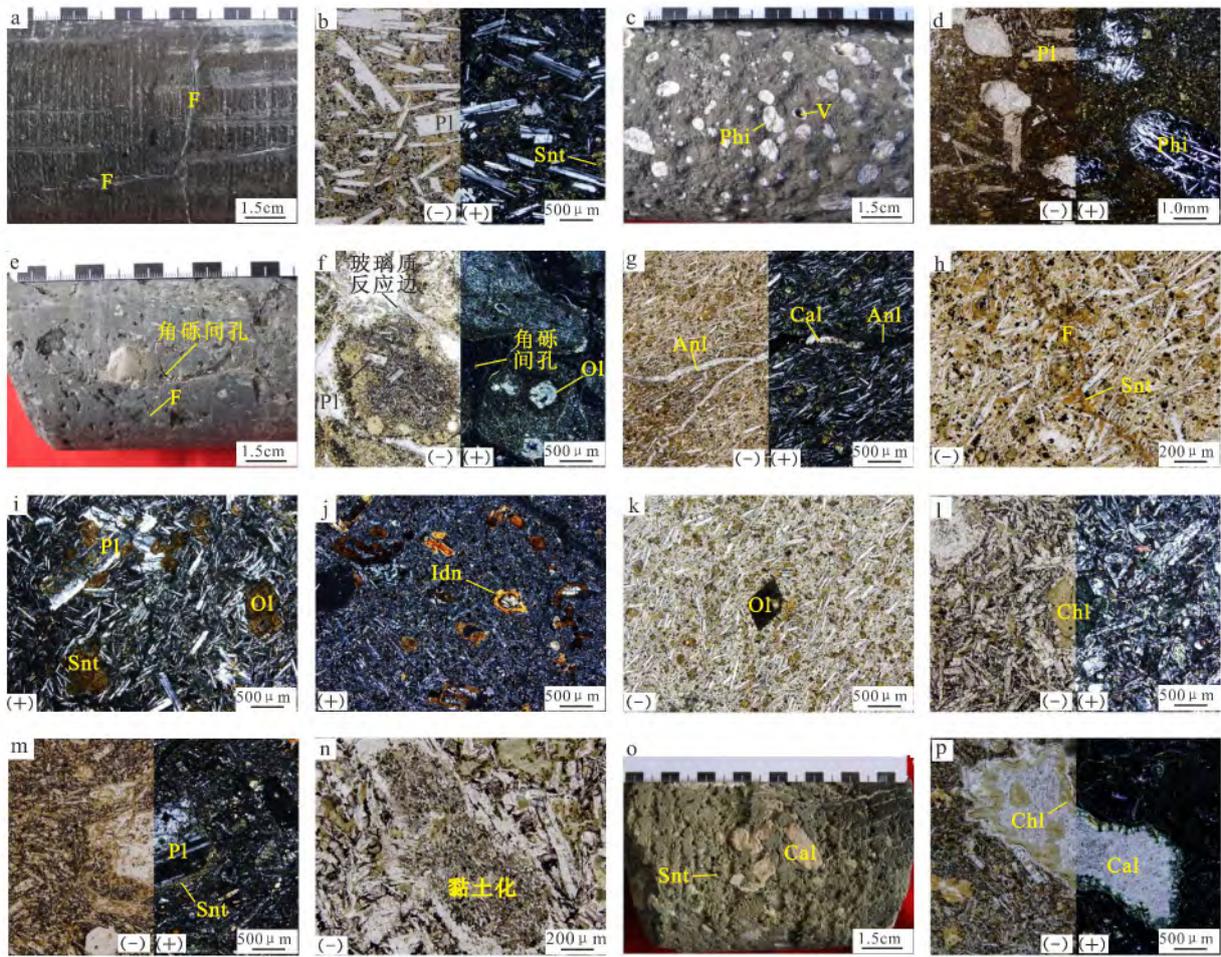
基于辽河盆地东部凹陷 45 口钻井的玄武岩测井资料, 选取自然伽马 (GR)、深侧向电阻率 (RLLD)、声波时差 (AC)、补偿密度 (DEN) 和补偿中子孔隙度 (CNL) 等 5 个测井参数, 开展研究区不同类型玄武岩的测井响应特征研究。在对测井资料标准化处理和取芯段测井数据岩性标定的基础之上, 发现本区玄武岩整体测井特征表现为中低伽马、低电阻率、中声波时差、中中子孔隙度, 密度值变化范围较大等特点 (表 1, 图 3)。

具体而言, 致密玄武岩自然伽马平均值为 36 API, 气孔玄武岩自然伽马平均值为 47 API, 角砾化玄武岩自然伽马平均值为 43 API, 3 种类型的玄武岩的伽马值大小顺序为: 气孔玄武岩 > 角砾化玄武岩 > 致密玄武岩 (表 1, 图 3)。

表 1 致密、气孔、角砾化玄武岩测井响应特征表

Table 1 Logging response to massive, vesicular and brecciated basalt

岩性	自然伽马		深侧向电阻率		密度		补偿中子		声波时差	
	GR/API		RLLD/ $\Omega \cdot m$		DEN/ g/cm^3		CNL/%		AC ($\mu s \cdot ft^{-1}$)	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
致密玄武岩	26 ~ 57	36	7 ~ 30	14	2.42 ~ 2.88	2.71	21 ~ 31	26	49 ~ 78	63
气孔玄武岩	32 ~ 61	47	6 ~ 47	15	2.19 ~ 2.71	2.47	18 ~ 51	32	57 ~ 93	72
角砾化玄武岩	28 ~ 83	43	6 ~ 12	8	2.14 ~ 2.72	2.51	23 ~ 36	29	63 ~ 81	71



a. 桃11井, 2 879.71 m, 沙一段, 岩芯; 致密玄武岩, 灰黑色, 呈致密块状, 裂缝 (F) 发育, 局部可见方解石充填。b. 图a岩芯对应薄片; 斑状结构, 斑晶为基性斜长石 (Pl), 薄片整体可见轻微的皂石 (Snt) 化。c. 桃11井, 2 147.59 m, 东三段, 岩芯; 气孔玄武岩, 灰黑色, 气孔构造, 气孔 (V) 孤立分布, 大多数气孔完全被钙十字沸石 (Phi) 充填。d. 图c岩芯对应的薄片; 斑状结构, 斑晶斜长石 (Pl), 气孔发育, 被钙十字沸石 (Phi) 充填, 斜长石斑晶完全蚀变为沸石, 整体强烈皂石化。e. 欧52井, 2 772.8 m, 沙三中段, 岩芯; 角砾化玄武岩, 灰黑色, 呈自碎角砾状, 角砾间孔和裂隙 (F) 发育, 多未被充填, 局部可见钙质和硅质充填。f. 图e岩芯对应的薄片; 角砾边部可见玻璃质反应边, 角砾呈玻基斑状结构, 斑晶为橄榄石 (Ol) 和斜长石 (Pl); 角砾间孔发育, 未被充填, 整体皂石化。g. 大26井, 1 612.37 m, 东二段, 薄片; 裂缝 (F) 内充填的方沸石 (Anl) 和方解石 (Cal)。h. 大26井, 1 612.37 m, 东二段, 薄片; 裂缝 (F) 内充填的皂石 (Snt)。i. 大25井, 1 173.96 m, 东二段, 薄片; 斜长石 (Pl) 部分蚀变为皂石 (Snt), 橄榄石 (Ol) 完全蚀变为皂石, 只保留晶形。j. 小3井, 2 877.1 m, 沙3下段, 薄片; 致密玄武岩内的橄榄石部分或全部蚀变为伊丁石 (Idn)。k. 大26井, 1 612.37 m, 东二段, 薄片; 橄榄石 (Ol) 全部析铁暗化, 仅保留晶形。l. 驾31井, 3 731.2 m, 沙三中段, 薄片; 辉石斑晶全部蚀变为绿泥石 (Chl), 仅保留晶形, 单偏光下呈黄绿色, 正交偏光下呈墨绿色。m. 小10井, 1 992.9 m, 沙三下段, 薄片; 斜长石 (Pl) 呈环带状蚀变, 斜长石边部可见皂石 (Snt) 环带。n. 驾31井, 3 731.2 m, 沙三中段, 薄片; 斜长石表面强烈黏土化, 可见少量绿泥石化, 蚀变呈筛孔状。o. 开21井, 2 215.3 m, 沙一段, 岩芯; 气孔玄武岩强烈蚀变, 表面呈黄绿色, 呈现出泥质岩的特征, 气孔被方解石 (Cal) 和皂石 (Snt) 充填。p. 桃11井, 2 875.71 m, 沙一段, 薄片; 气孔完全充填, 边部充填绿泥石 (Chl), 中部充填方解石 (Cal)。

图2 东部凹陷玄武岩基本类型及典型岩石学特征

Fig. 2 Basalt types and typical petrological characteristics of eastern depression

致密玄武岩电阻率平均值为 $14 \Omega \cdot \text{m}$, 气孔玄武岩电阻率平均值为 $15 \Omega \cdot \text{m}$, 角砾化玄武岩电阻率平均值为 $8 \Omega \cdot \text{m}$, 角砾化玄武岩的电阻率值明显偏小。

致密玄武岩密度平均值为 $2.71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 气孔玄武岩平均值为 $2.47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 角砾化玄武岩平均值为 $2.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 气孔玄武岩的密度值最低。

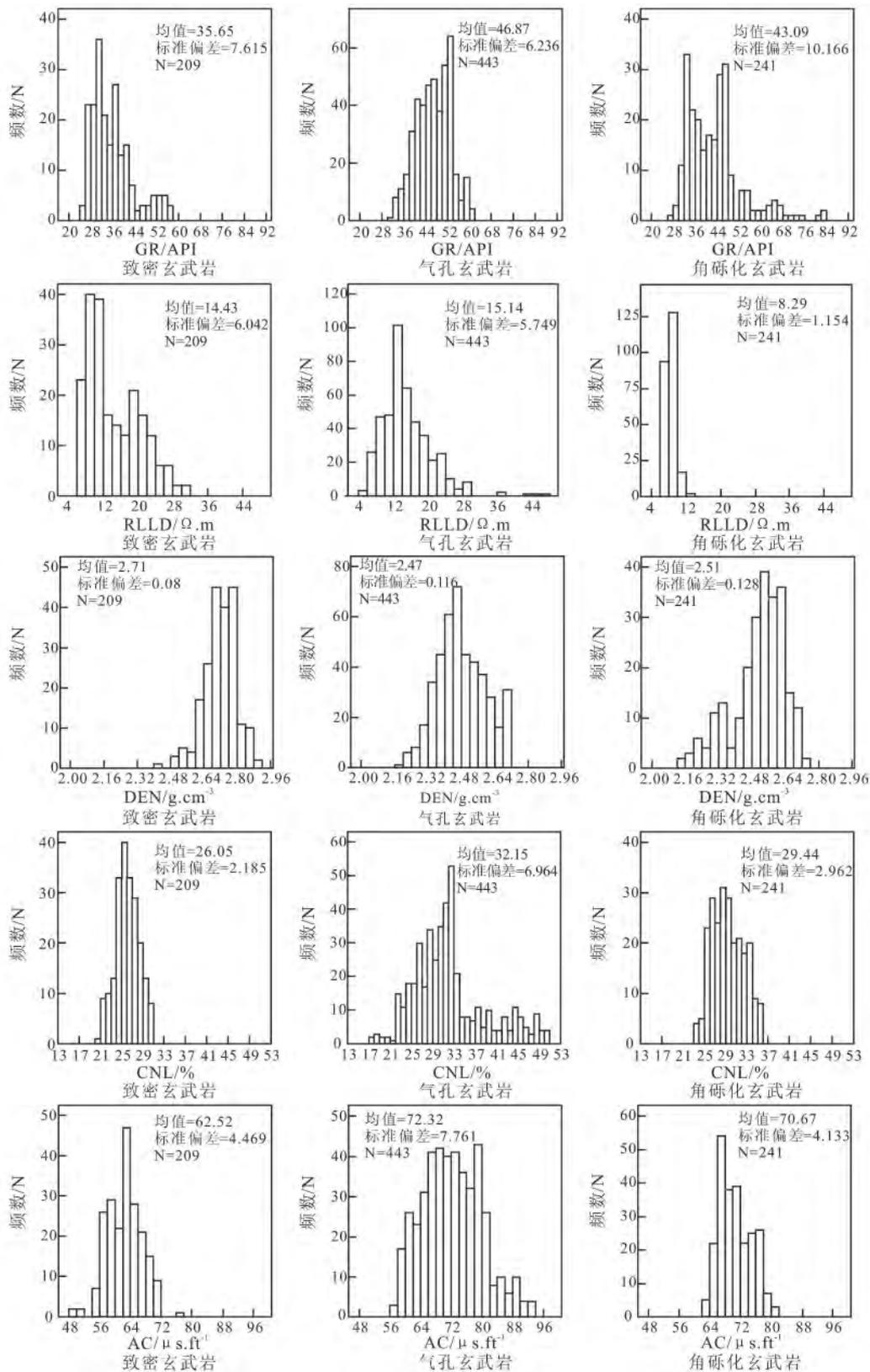


图 3 致密、气孔、角砾化玄武岩测井响应柱状图

Fig. 3 Histogram of logging response to massive, vesicular and brecciated basalt

致密玄武岩补偿中子孔隙度平均值为 26%，气孔玄武岩平均值为 32%，角砾化玄武岩平均值为 29%，气孔玄武岩的孔隙度相对较高。

致密玄武岩声波时差平均值为 $63 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$ ，气孔玄武岩声波时差平均值为 $72 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$ ，角砾化玄武岩平均值为 $71 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$ ，致密玄武岩的声

波传导速度最快。

综合对比 3 种不同结构构造的玄武岩，致密玄武岩以低伽马、高密度为特征，气孔玄武岩以低密度和高声波时差为特征，角砾化玄武岩以低电阻率为特征（图 4）。3 种岩性类型可以通过 RLLD-DEN 交会图进行较好的区分（图 4b）。

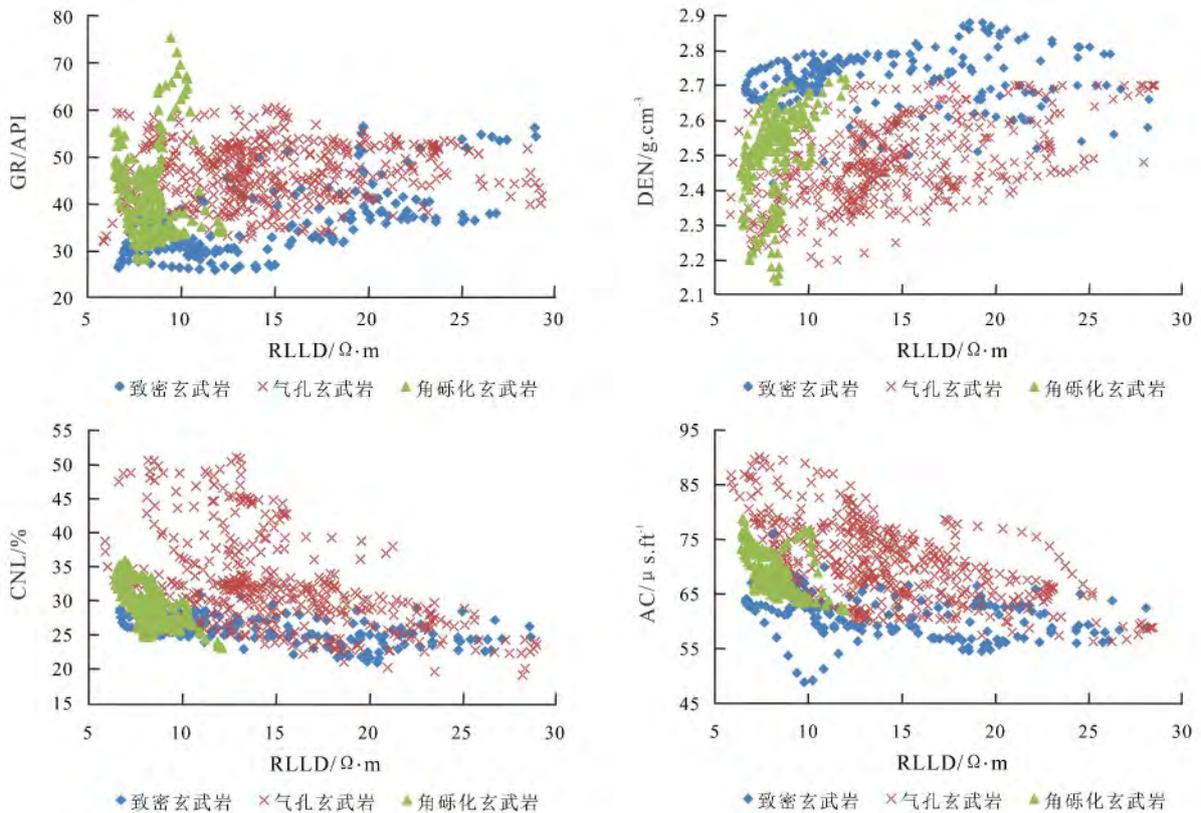


图 4 致密、气孔、角砾化玄武岩各测井参数交会图

Fig. 4 Cross-plots of each logging parameters to massive, vesicular and brecciated basalt

4 玄武岩测井响应机理

4.1 自然伽马 (GR)

自然伽马与岩石中放射性元素钾 (K)、钍 (Th) 和铀 (U) 丰度正相关。玄武岩中这 3 种元素的丰度相对较低，在无异常富集的情况下，影响自然伽马值的主要因素是玄武岩中 K 元素的含量^[9]。玄武岩中 K 元素主要赋存在长石及黏土矿物中。研究区玄武岩中的长石为中基性斜长石，钾长石几乎不可见（图 2），因此，本区不同类型玄武岩中自然伽马响应的差异主要反映了黏土矿物的成份及含量。

本区玄武岩中黏土矿物的来源主要有两个，一是辉石、橄榄石和斜长石等矿物的蚀变（图 2i - 图 2n）和玻璃质基质的脱玻化（图 2f），蚀变过程中 K 作为相容元素，会产生一定程度的富集^[21]，另一来源为岩石孔隙中黏土矿物的充填。斜长石的黏土矿化是本区玄武岩中普遍存在的现象（图 2m - 图 2n），只是因为气孔玄武岩和角砾化玄武岩中孔隙和裂缝相对发育（图 2c、图 2e），因此两者蚀变程度明显强于致密玄武岩（图 2b、图 2d、图 2f），此外，角砾化玄武岩因角砾间孔和裂缝多未被充填（图 2f），而气孔玄武岩的气孔中全部或部分充填沸石（图 2c、图 2d）、皂石（图 2o）和绿

泥石等黏土矿物 (图 2p)。通过薄片观察气孔玄武岩皂石化程度相对角砾化玄武岩更大 (图 2d、图 2f)。因此, 气孔玄武岩黏土矿物含量高于角砾化玄武岩, 其自然伽马响应值最高。

4.2 深侧向电阻率 (RLLD)

岩石电阻率受岩石的矿物成分、热液蚀变、孔缝发育程度和含油气性的综合影响^[11, 13]。本地区 3 种玄武岩类型电阻率平均值呈现角砾化玄武岩 < 致密玄武岩 < 气孔玄武岩的特征 (表 1, 图 3)。究其原因, 气孔玄武岩的气孔多为孤立的气孔, 且多已被充填为杏仁 (图 2c), 而角砾化玄武岩的孔隙多为角砾间孔和裂隙, 呈连通状态, 且充填程度较低 (图 2e、图 2f)。而致密玄武岩虽然气孔不发育, 但往往发育裂缝 (图 2a)^[22], 使孔隙中的流体 (玄武岩内的流体以地层水为主, 油气仅在个别井段存在, 因此本文是在地层流体为地层水的情况下讨论的) 呈流通状态, 因此其电阻率小于气孔玄武岩, 而大于角砾化玄武岩。

东部凹陷的玄武岩经受了强烈的蚀变, 多整体强烈皂石化 (图 2b、图 2d、图 2f) 或脱玻化 (图 2f), 辉石和橄榄石等暗色矿物通常蚀变为绿泥石、皂石、伊丁石, 部分矿物出现析铁暗化的现象, 部分全部蚀变, 只保留晶形 (图 2i - 图 2l); 斜长石则多黏土矿化 (图 2n)、皂石化 (图 2m)、绿泥石化 (图 2n), 部分全部蚀变, 部分呈现出环带状 (图 2m) 或筛孔状 (图 2n) 蚀变的特征。蚀变强烈的玄武岩甚至呈现泥质岩类特征 (图 2o), 因此, 与松辽盆地^[9]、准噶尔盆地^[23] 和三塘湖盆地^[24] 玄武岩相比, 其电阻率值明显偏低。

4.3 密度 (DEN)

玄武岩体积密度不但与岩石矿物成分及其含量有关, 还与岩石孔隙度和孔隙中流体类别、性质及含量有关。岩石的体积密度 (ρ_b) 与孔隙度 (φ)、孔隙内流体密度 (ρ_f) 和骨架密度 (ρ_{ma}) 之间有如下关系:

$$\rho_b = \varphi\rho_f + (1 - \varphi) \rho_{ma} \quad (1)$$

玄武岩孔隙内充填流体为地层水、油和天然气, 其密度远小于岩石骨架密度, 因此孔隙度越大, 玄武岩的体积密度就越小。由于气孔玄武岩和角砾化玄武岩中孔隙相对于致密玄武岩较发育 (图 2a、图 2c、图 2e), 尽管气孔玄武岩孔隙多被

沸石和方解石充填 (图 2c), 但沸石和方解石密度小于玄武岩骨架密度。另外由于气孔玄武岩和角砾化玄武岩结晶程度均明显小于致密玄武岩 (图 2b、图 2d、图 2f), 而结晶程度好的玄武岩密度较大^[25], 因此综合来看, 致密玄武岩密度最大。此外, 根据岩芯薄片观察, 气孔玄武岩蚀变程度高于角砾化玄武岩 (图 2d、图 2f、图 2o), 使得其骨架密度进一步降低, 因此气孔玄武岩密度整体要小于角砾化玄武岩密度。

4.4 补偿中子孔隙度 (CNL)

地层对能量 > 0.1 Mev 快中子的减速能力主要取决于地层含氢量。由于玄武岩的原始造岩矿物成分不含氢, 因此其减速能力主要取决于其孔隙中所含流体的氢含量。此外, 玄武岩蚀变生成的黏土矿物本身也常含有大量的结晶水^[21], 因此, 岩石的蚀变程度亦在一定程度上影响了其补偿中子孔隙度。

东部凹陷气孔玄武岩和角砾化玄武岩中原生孔隙发育, 孔隙度明显高于致密玄武岩, 孔隙中充填的水和烃类, 使得二者补偿中子孔隙度大于致密玄武岩。另外由于气孔玄武岩的原生孔隙更发育, 易遭受地层流体的改造, 因此其蚀变程度要大于角砾化玄武岩 (图 2b、图 2d、图 2f), 除了辉石和橄榄石常蚀变为皂石、伊丁石和绿泥石, 斜长石黏土矿化外, 气孔玄武岩中的气孔中普遍被沸石 (图 2d)、皂石 (图 2o)、绿泥石 (图 2p) 等黏土矿物充填, 使得其含有相对较多的结晶水或结构水, 整体含氢量大于角砾化玄武岩, 因此, 其补偿中子孔隙度大于角砾化玄武岩。

4.5 声波时差 (AC)

声波时差与岩石的矿物组成、结构构造、孔缝发育程度、孔缝中流体的性质和饱和度有密切关系。声波在岩石传播时间 (Δt)、岩石孔隙度 (φ)、声波在孔隙流体中传播时间 (Δt_f)、声波在岩石骨架中传播时间 (Δt_{ma}) 存在关系:

$$\Delta t = \varphi\Delta t_f + (1 - \varphi) \Delta t_{ma} \quad (2)$$

声波在岩石骨架中的传播速度远大于在地层流体中的传播速度, 因此, 孔缝不发育的致密岩石具有较小的声波时差值。

本区 3 种类型玄武岩, 其主体矿物组成相似, 主要不同之处在于孔缝类型及发育程度和岩石的蚀

变程度。致密玄武岩整体呈致密块状,气孔和裂缝不发育,且蚀变程度较低,蚀变以斑晶矿物的斑点状蚀变为主(图2n),故其声波时差最小。与角砾化玄武岩相比,气孔玄武岩孔隙度更大(表1,图3),且其蚀变程度也大于角砾化玄武岩(图2d、图2f、图2o),因此气孔玄武岩声波时差大于角砾化玄武岩。

5 结论

(1) 东部凹陷玄武岩细分为致密玄武岩、气孔玄武岩和角砾化玄武岩等3类。研究区玄武岩整体成岩改造严重,黏土矿化明显。致密玄武岩蚀变程度最低,气孔玄武岩蚀变程度最高。

(2) 东部凹陷玄武岩测井响应整体呈现出中—低伽马,低电阻率,中声波时差,中中子孔隙度,密度值变化范围较大的特征。致密玄武岩以低自然伽马、高密度、低声波时差为特征;气孔玄武岩则呈低密度、高声波时差;角砾化玄武岩以低电阻率为特征。

(3) 东部凹陷玄武岩的常规测井响应受玄武岩的矿物成分、蚀变特征(类型和程度)、孔缝发育和充填情况、孔缝中流体类型和含量等因素综合影响,其中,蚀变、孔隙和流体是导致不同类型玄武岩测井响应出现差异的主要因素。

参考文献:

[1] Wu C Z, Gu L X, Ren Z W, et al. Transition from plate margin to intraplate environment: geochemistry of basalts in Paleogene Liaohe Basin, northeastern China [J]. Science in China (Ser. D): Earth Sciences, 2005, 48 (12): 2069-2080.

[2] Chen Z Y, Yan H, Li J S, 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.

[3] Luo J, Morad S, Liang Z, et al. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohe Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89 (10): 1319-1346.

[4] Gu L X, Ren Z W, Wu C Z, et al. Hydrocarbon reservoirs in a trachyte porphyry intrusion in the eastern depression of the Liaohe Basin, Northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86 (10): 1821-1832.

[5] 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 Cai-neng, ZHAO Wen-zhi, JIA Cheng-zao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35 (3): 257-271.

[6] 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 Yu-long, SHAN Jun-feng, BIAN Wei-hua, 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.

[7] 谷团, 戴金星, 牛嘉玉. 辽河拗陷东部凹陷中段古近系粗面岩有效储集层的识别 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34 (3): 310-315.
GU Tuan, DAI Jin-xing, NIU Jia-yu. Effective reservoir recognition of paleogene trachyte in the middle part of the east sag of Liaohe Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34 (3): 310-315.

[8] 蔡国钢, 张坤, 刘立, 等. 辽河盆地东部凹陷中部火山岩储层特征研究 [J]. 海洋石油, 2003, 23 (2): 32-37.
CAI Guo-gang, ZHANG Kun, LIU Li, et al. The reservoir characteristics of the middle section volcanic rock of the eastern sag on Liaohe Basin [J]. Offshore Oil, 2003, 23 (2): 32-37.

[9] 黄玉龙, 孙德有, 王璞珺, 等. 松辽盆地营城组玄武岩流动单元测井响应特征 [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (2): 524-533.
HUANG Yu-long, SUN De-you, WANG Pu-jun, et al. Characteristics of well-logging response to lava flow units of the Lower Cretaceous basalts in Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (2): 524-533.

[10] Wang P J, Chen S M. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99 (3): 499-523.

[11] 潘保芝, 李舟波, 付有升, 等. 测井资料在松辽盆地火成岩岩性识别和储层评价中的应用 [J]. 石油物探, 2009, 48 (1): 48-52.
PAN Bao-zhi, LI Zhou-bo, FU You-sheng, et al. Application of logging data in lithology identification and reservoir evaluation of igneous rock in Songliao Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48 (1): 48-52.

[12] 牟丹, 王祝文, 黄玉龙, 等. 基于 SVM 测井数据的

- 火山岩岩性识别: 以辽河盆地东部拗陷为例 [J]. 地球物理学报, 2015, 58 (5): 1785-1793.
MOU Dan, WANG Zhu-wen, HUANG Yu-long, et al. Lithological identification of volcanic rocks from SVM well logging data: case study in the eastern depression of Liaohe Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58 (5): 1785-1793.
- [13] 房春慧, 潘保芝, 刘思慧, 等. 含气饱和度对致密砂岩纵波速度影响的实验研究及应用 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30 (4): 1673-1676.
FANG Chun-hui, PAN Bao-zhi, LIU Si-hui, et al. Experimental study and application on effect of gas saturation on P-wave velocity [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30 (4): 1673-1676.
- [14] 冯玉辉, 黄玉龙, 丁秀春, 等. 辽河盆地东部凹陷中性火山岩相地震响应特征及其机理探讨 [J]. 石油物探, 2015, 53 (2): 206-215.
FENG Yu-hui, HUANG Yu-long, DING Xiu-chun, et al. Relationship between intermediate- mafic volcanic facies and their corresponding seismic reflections: a case study from eastern depression of Liaohe Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 53 (2): 206-215.
- [15] 高鹏程, 边伟华, 刘鑫, 等. 辽河盆地东部凹陷东营组火山岩特征及油气封盖作用 [J]. 世界地质, 2015, 34 (2): 445-453.
GAO Peng-cheng, BIAN Wei-hua, LIU Xin, et al. Characteristics of volcanic rocks from Dongying Formation and their sealing effects in eastern depression of Liaohe Basin [J]. Global Geology, 2015, 34 (2): 445-453.
- [16] 陈义贤. 辽河裂谷盆地断裂演化序次和油气藏形成模式 [J]. 石油学报, 1985, 6 (2): 1-11.
CHEN Yi-xian. The evolution of faults and formation of oil and gas reservoirs in the Liaohe rift valley [J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6 (2): 1-11.
- [17] 漆家福, 陈发景. 辽东湾—下辽河裂陷盆地的构造样式 [J]. 石油与天然气地质, 1992, 13 (3): 272-283.
QI Jia-fu, CHEN Fa-jing. Structural style in Liaodongwan—Xialiaohe Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13 (3): 272-283.
- [18] 赵澄林, 孟卫工, 金春爽, 等. 辽河盆地火山岩与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 15-26.
ZHAO Cheng-lin, MENG Wei-gong, JIN Chun-shuang, et al. Liaohe Basin volcanic rocks and hydrocarbon [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 15-26.
- [19] 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 Si-wei, WANG Pu-jun, DING Xiu-chun, 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.
- [20] 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 Yan-quan, HU Da-qian, CAI Guo-gang, et al. Characteristics and controlling factors of Cenozoic volcanic reservoirs in Liaohe Basin, NE China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34 (5): 896-904.
- [21] Bucker C J, Delius H, Wohlenberg J. Physical signature of basaltic volcanics drilled on the northeast Atlantic volcanic rifted margins [J]. Geological Society of London Special Publication, 1998, 136 (1): 363-374.
- [22] Zakharaova N V, Goldberg D S, Sullivan E C, et al. Petrophysical and geochemical properties of Columbia River flood basalt: implications for carbon sequestration [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2012, 13 (11): 53-73.
- [23] 张勇, 查明, 孔玉华, 等. 地下复杂火山岩岩性测井识别方法: 以准噶尔盆地克拉美丽气田为例 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27 (5): 21-26.
ZHANG Yong, ZHA Ming, KONG Yu-hua, et al. Study on lithologic identification of the underground complex volcanics: taking Kelameili gasfield in Junggar Basin as an example [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27 (5): 21-26.
- [24] 宫清顺, 黄革萍, 孟祥超, 等. 三塘湖盆地火山岩岩性识别方法 [J]. 中国石油勘探, 2012 (3): 37-41.
GONG Qing-shun, HUANG Ge-ping, MENG Xiang-chao, et al. Methods for lithology discrimination of volcanics in Santanghu Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2012 (3): 37-41.
- [25] Moore J G. Density of basalt core from Hilo drill hole, Hawaii [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2001, 112 (1): 221-230.