

文章编号: 1004-5589 (2016) 01-0264-11

地层元素测井 (ECS) 中不相容元素特征 对薄层火山地层对比的约束 ——以松辽盆地南部王府断陷火石岭组流纹质火山岩为例

李建华¹, 屈卫华², 赵然磊¹, 刘洪涛², 唐华风¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;

2. 吉林油田公司 勘探开发研究院, 吉林 松原 138000

摘要: 利用 ECS (Elemental Capture Spectroscopy) 测井资料中 Gd 和 Ti 交汇图进行火山地层对比。结果表明王府断陷流纹质火山地层可划分为 5 个地层单元; 存在明显间断期的 CS13 和 CS14 井均揭示 Ti 元素变化特征是上覆层段 (晚喷发期) 含量高, 并推测火山喷发顺序为期次 1-期次 2-期次 3。火山活动从南到北叠置迁移变化, 经历了弱 (期次 1)-强 (期次 2)-弱 (期次 3) 的喷发序列。对比实测孔隙度、渗透率与喷发期次的关系, 可知期次 2 储层物性最优, 期次 1 次之, 期次 3 储层物性较差, 有利储层分布在期次 2 范围内。

关键词: 松辽盆地; 王府断陷; 火石岭组; 不相容元素; 喷发期次; ECS 测井

中图分类号: P631.44; P631.32 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.01.028

Constraint of incompatible elements in ECS to comparison of thin layer volcanostrata: a case study of rhyolitic volcanostrata of Huoshiling Formation in Wangfu fault depression, southern Songliao Basin, NE China

LI Jian-hua¹, QU Wei-hua², ZHAO Ran-lei¹, LIU Hong-tao², TANG Hua-feng¹

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

2. PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, Jilin, China

Abstract: The cross-plot of Gd and Ti of ECS (Elemental Capture Spectroscopy) well logging data is used to contrast the volcanic layers. The results show that the rhyolitic volcanic layer in Wangfu fault depression can be divided into 5 stratigraphic units. The CS13 and CS14 wells with obvious break-in periods reveal that the characteristics of Ti is high in later eruption stage, so the volcanic eruptive sequence is the stages: 1-2-3. The volcanic activity migrated from south to north, with the eruptive strength from weak (eruptive stage1) to strong (eruptive stage 2) and then to weak (eruptive stage3) in sequence. The reservoir quality in descending order is eruptive stage 2-1-3 according to the relationship between the porosity and permeability of logging and the eruptive stages, and the

收稿日期: 2015-10-12; 改回日期: 2015-12-06

基金项目: 国家“973”计划项目 (2012CB822002) 与国家自然科学基金项目 (41472304) 联合资助。

通讯作者: 唐华风 (1979-), 男, 副教授, 主要从事火山岩储层地质-地球物理综合研究。E-mail: tanghfnc@jlu.edu.cn

distribution of favorable reservoir is in the eruptive stage 2.

Key words: Songliao Basin; Wangfu fault depression; Huoshiling Formation; incompatible elements; eruptive stages of volcanostratigraphy; ECS logging

0 引言

随着火山岩油气藏勘探开发速度的加快,对火山地层的研究也越来越深入^[1-6],笔者对松辽盆地南部王府断陷流纹质火山岩地层进行研究,其中火山地层是指以火山岩为主并与沉积岩共生的地层,火山物质在地表堆积,基本呈层状分布,随着盆地沉降被全部或部分保存^[2]。火山地层又是似层状、层状和块状结构组成的复合体,其地层结构的拟合是火山岩储层地震预测的难点所在,火山地层结构模型的建立是火山岩勘探开发中需要解决的关键问题^[7]。

火山活动造成火山岩岩相变化快、储层物性变化大以及不同期次的火山岩叠置,导致地震响应特征复杂,规律性差。目前,三维地震资料对于薄层火山地层喷发旋回和期次的划分、有效储层的预测

以及气藏评价仍存在一定的困难,影响着天然气藏的有效勘探开发^[8]。以往中国在对火山地层划分中,考虑到火山活动的规律性及火山地层的特殊性,提出以岩系-旋回-韵律-期次作为火山地层划分单位^[9]。对于陆相火山地层单位与划分的讨论中,提出用火山构造-组-岩相-层四级作为火山地层划分单位^[10]。伴随着盆地火山岩油气藏勘探开发的加快,常规划分方法已经远远不能达到火山岩储层精细勘探和火山机构详细划分的要求,不同学者对不同地区火山岩旋回期次划分方法大同小异,主要包括地质方法和地球物理方法 2 种。地质方法包括对地质界面识别(风化壳、沉积夹层、火山灰层)以及岩性组合特征、岩相序列的分析。地球物理方法主要是采用测井和地震结合的方法(表 1)。

表 1 火山岩旋回、期次划分方法统计表

Table 1 Statistical table of classification methods to volcanic cycles and stages

| 研究地区 | 旋回、期次划分方法 | | 参考文献 |
|-------------------|--------------------------------------------|--------------------|----------|
| | 地质方法 | 地球物理方法 | |
| 松辽盆地营城组 | 界面识别(风化壳、沉积夹层、火山灰层)岩性组合、岩相序列分析 | 测井资料与地震资料运用 | 据文献 [11] |
| 新疆三塘湖盆地牛东地区卡拉南组 | 界面识别(风化壳、沉积夹层、火山灰层)岩性组合、岩相序列分析 | 岩性、岩相测井相应特征与地震资料运用 | 据文献 [12] |
| 新疆三塘湖盆地马朗凹陷哈尔加乌组 | 界面识别(风化壳、发育稳定的火山灰层或(沉)凝灰岩层),岩性组合、岩相序列分析 | 测井资料与地震资料运用 | 据文献 [13] |
| 松辽盆地徐家围子断陷营城组一、三段 | 界面识别(风化壳、沉积夹层、火山灰层),火山岩岩性及其韵律特征,火山岩相带的周期变化 | 测井资料与地震资料运用 | 据文献 [14] |
| 松辽盆地地下白垩统营城组 | 岩性特征和同位素年龄,沉积岩夹层、风化壳、喷发物相互叠置关系、 | GR 测井曲线以及地震资料 | 据文献 [15] |

由于王府断陷流纹质火山岩厚度薄,岩性、岩相复杂,常用的地震和测井方法不能有效进行地层对比。通过对岩浆结晶分异过程中不相容元素 Gd、Ti 的研究,岩浆在结晶分异过程中不相容元素逐

渐富集^[16,17],根据这一规律可知,同期火山岩不相容元素特征相同,不同期火山岩不相容元素特征不同,以期薄层火山岩地层对比提供一种方法,为迅速锁定勘探有利目标,提高勘探效率提供有力

的依据。

1 地质概况

松辽盆地是中国东北地区大型的内陆盆地，发育大量中生代地层，并且具有下断上拗的二元结构特征。本次研究区王府断陷属于松辽盆地东南隆起区的二级构造单元，总面积约为 2 800 km²，有效勘探面积约为 800 km²（图 1）。

王府断陷深层自下而上发育有火石岭组、沙河子组、营城组和登娄库组地层。其中火山岩主要分布在火石岭组和沙河子组底部，本文所研究的目的层段为火石岭组二段上部流纹质火山岩层段，在研究区内共有 12 口井钻遇该层段，钻揭主要岩性为流纹岩、流纹质凝灰熔岩、流纹质角砾熔岩，主要岩相为爆发相中的热碎屑流亚相、空落亚相（图 2）。

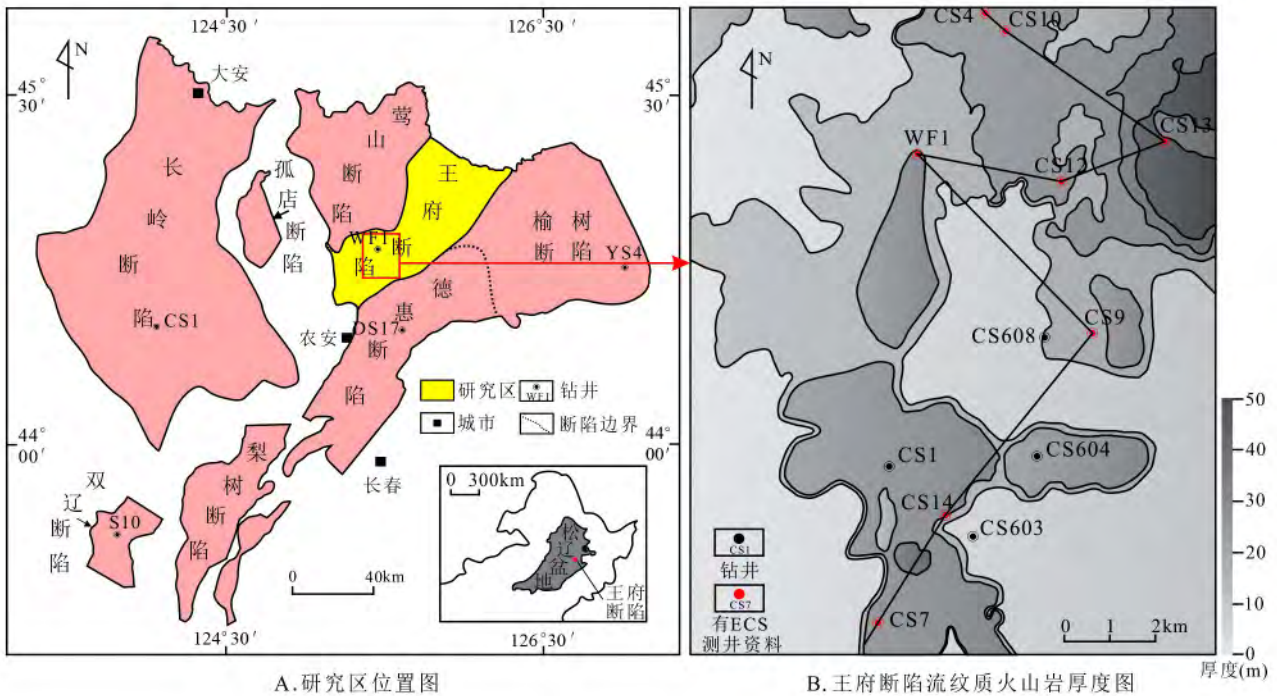


图 1 研究区位置和流纹质火山地层厚度图
Fig. 1 Location of research area and rhyolitic volcanostratigraphy thickness

钻井揭示该薄层流纹质火山岩间夹有 2.7 m 凝灰岩夹层以及 0.8 m 的风化壳，表明火山活动过程中存在间歇，可以划分出期次。统计资料显示该流纹质火山岩层段平均厚度 20 m ±，整体较薄，且岩性、岩相复杂（图 2），受地震资料精度的限制（地震资料显示与其上伏煤层显示为一个同相轴），不能够反映出该薄火山地层的叠置关系，从而限制了利用地震资料划分期次的可行性。GR 测井值变化（图 3）也不能实现对期次的划分。

2 Gd、Ti 数据采集及校正

ECS (Elemental Capture Spectroscopy) 是元素

俘获测井的简称，是斯伦贝谢新一代的测井仪器，利用俘获伽玛能谱确定元素含量，纵向分辨率和探测深度分别为 45.72 cm 和 22.86 cm，而且适用性很强，在淡水、饱和盐水、油基泥浆、含气泥浆、重晶石泥浆、氯化钾泥浆、不规则井眼和高温井下都能采集到高质量的资料^[18]。在实验室条件下，应用特殊的实验设备测量得到元素的标准谱。在每一个采样点，测量的 ECS 伽玛能谱经过剥谱处理，可以得到一组元素谱数据，与实验室标准谱对比，就可以得到 H、Cl、S、Ca、Fe、Ti、Na、Gd 和 K 等元素的俘获产额，以及 C、O、Si、Ca 和 Fe 元素的非弹产额。地层中化学元素一般都是以氧化物

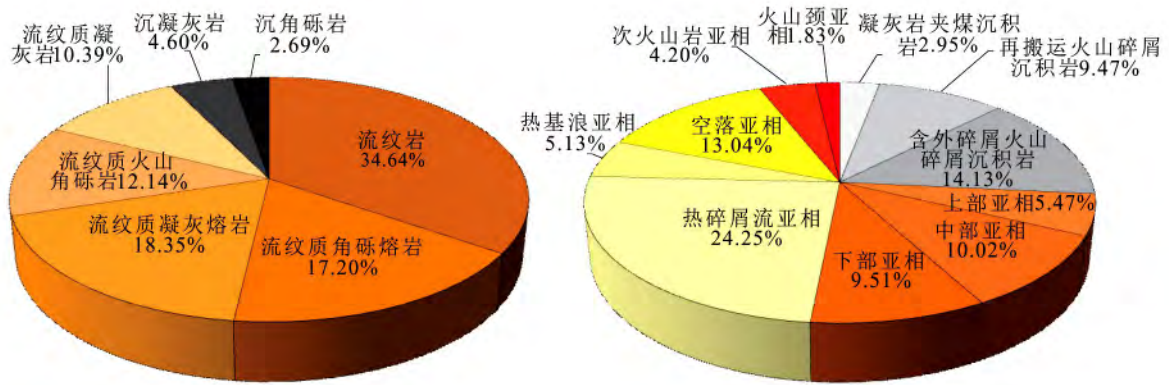


图 2 王府断陷火石岭组流纹质火山地层岩性和岩相特征

Fig. 2 Characteristics of lithology and lithofacies of the rhyolitic volcanostratigraphy in Huoshiling Formation , Wangfu fault depression

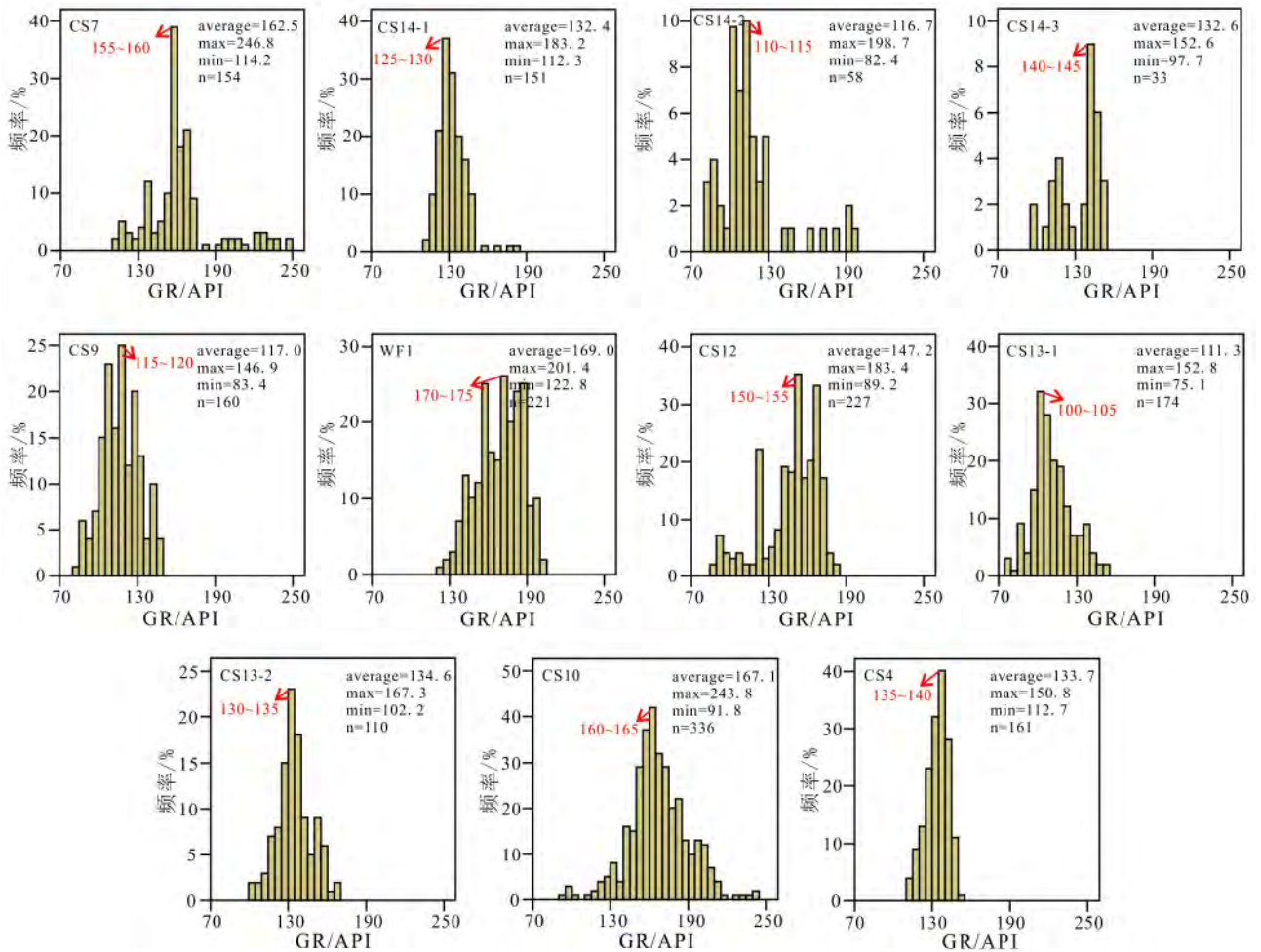


图 3 王府断陷火石岭组流纹质火山地层各井段伽玛值频率分布直方图

Fig. 3 Histogram of Gamma logging data of rhyolitic volcanostrata in Huoshiling Formation , Wangfu fault depression

的形式存在，应用氧闭合技术将地层中 Si、Fe、Ca、S、Ti 和 Gd 的元素产额转换为干重量百分含量^[19-21]。利用 Z366 井全岩分析中 Ti 元素含量与 ECS 测井中 Ti 元素含量进行对比。得出 Ti 元素在地层中微量，但两者的测量值大致相符^[19]，由此判定 ECS 测井数据较为精确，可以使用。

2.1 泥岩标准层的确定

对于 Gd、Ti 数据的校正，以泥岩中 Gd、Ti 数据分布为标准进行，泥岩是在稳定环境条件下形

成，不相容元素在泥岩中的含量大体一致，即泥岩中不相容元素含量均一。通过对相关资料的研究发现，泥岩测试样品中不相容元素含量表现均一^[22-25]。表明利用泥岩对各井中 Gd、Ti 数据进行校正可行。对于泥岩标准层的选取，则是选出每口井中的任意一段泥岩（图 4），利用泥岩中不相容元素的含量对各井流纹质火山岩中 Gd、Ti 数据进行校正。

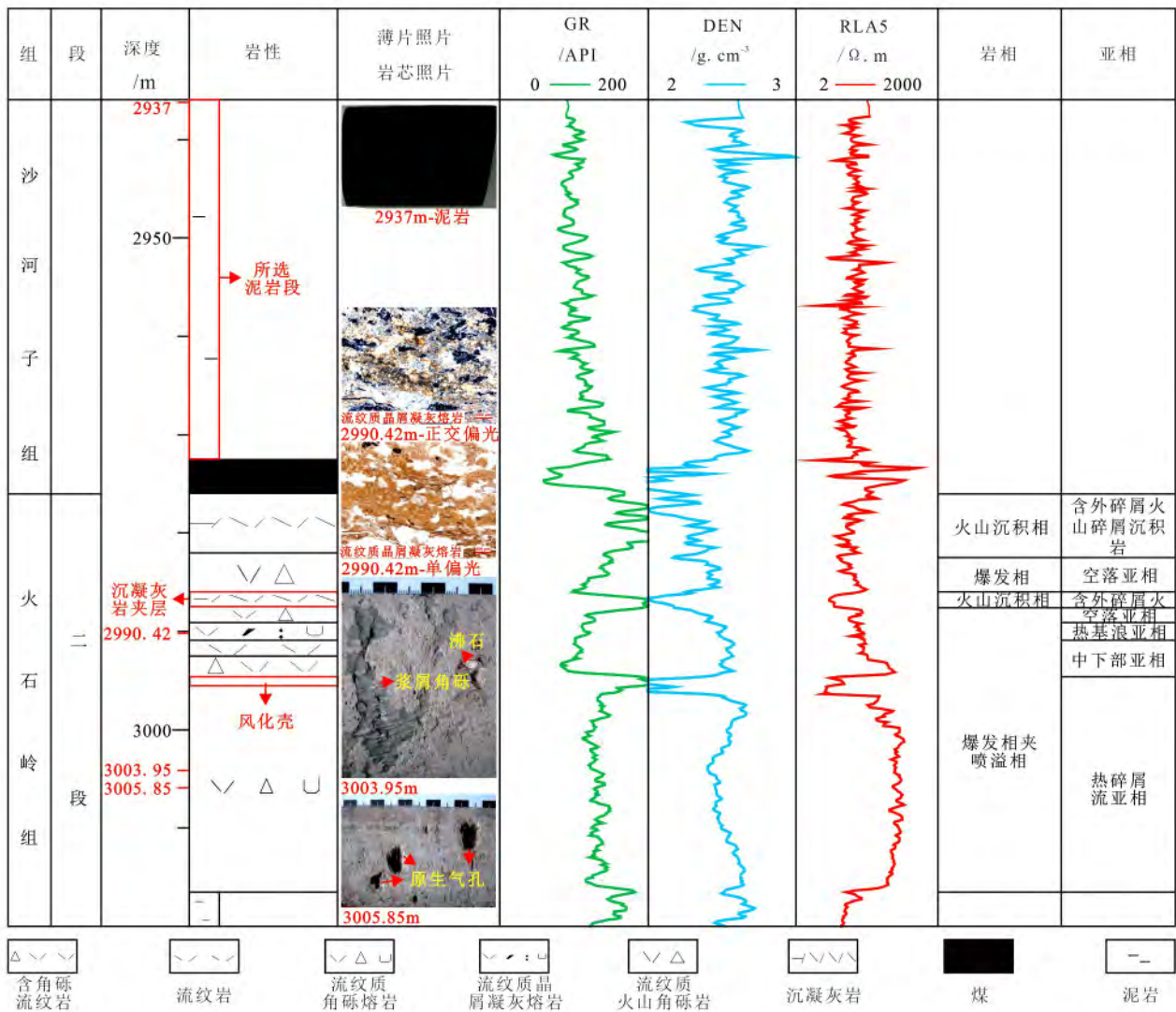


图 4 王府断陷 CS14 火石岭组流纹质火山地层综合柱状图和测井数据标准化标准层特征

Fig. 4 Stratigraphic columnar section and characteristics of marker bed for normalization of logging data of Well CS14, Wangfu fault depression

2.2 数据校正

对所选泥岩中的 Gd、Ti 分别作频率分布直方

图，根据直方图中的峰值对原始数据进行校正。Gd 元素频率分布直方图（图 5）中峰值出现在 8 ×

$10^{-6} \sim 8.5 \times 10^{-6}$ 的最多, 有 6 口井, 因此以 $8 \times 10^{-6} \sim 8.5 \times 10^{-6}$ 为 Gd 元素的标准值对其他井数据进行校正, 即将各井中 Gd 元素的峰值调到一致。Ti 元素频率分布直方图 (图 6) 中峰值出现在 $0.19\% \sim 0.2\%$ 的最多, 有 3 口井, 因此以 0.19%

$\sim 0.2\%$ 为 Ti 元素的标准值对其他井进行校正。根据图 5、图 6 中 Gd 和 Ti 峰值可得出各井校正量 (表 2), 其中 CS9 井和 CS13 井校正量较大, 其他井校正量较小。

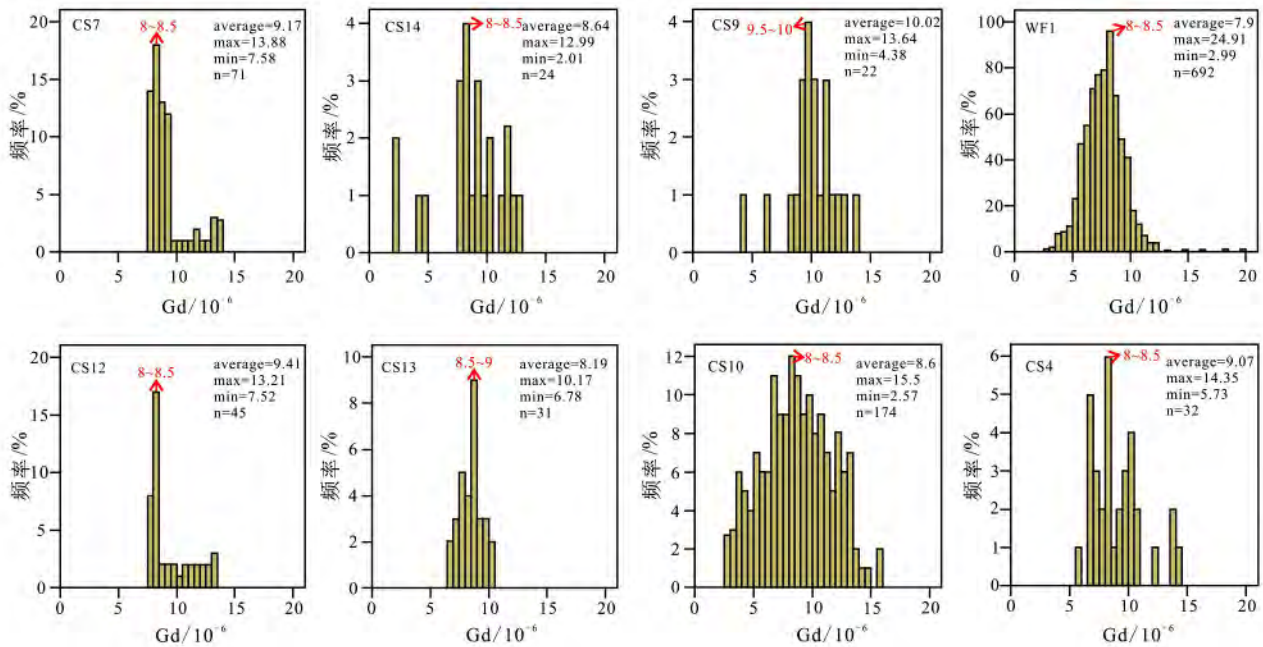


图 5 测井数据标准化泥岩标准层的 Gd 元素频率分布直方图
Fig. 5 Histogram of Gd in mudstone of Wangfu fault depression

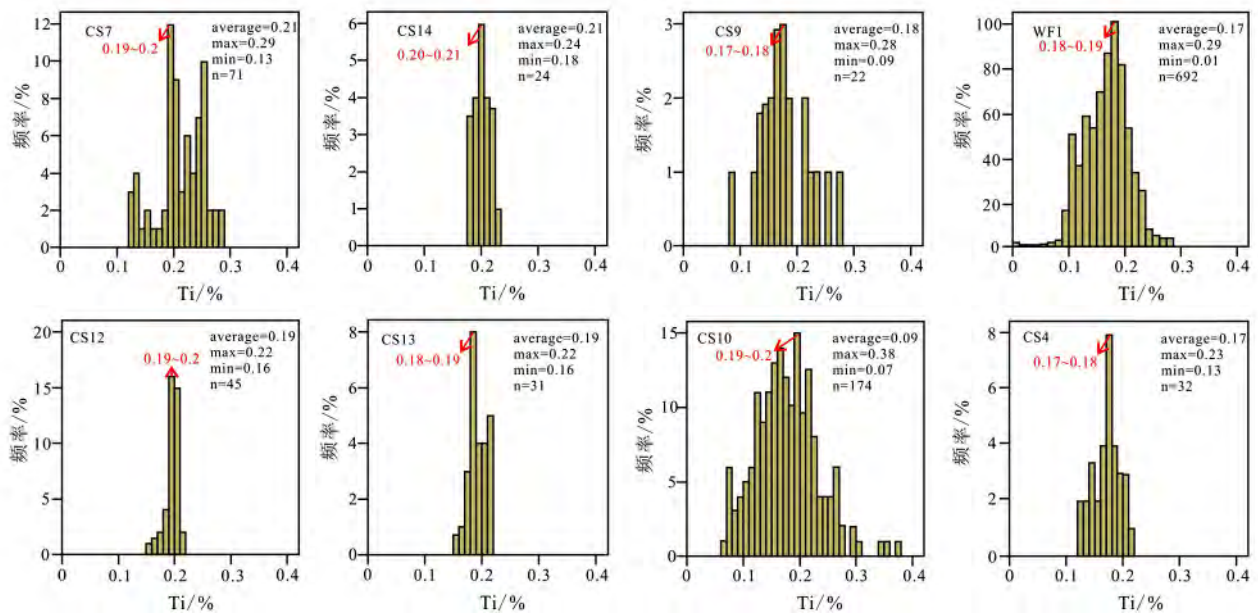


图 6 测井数据标准化泥岩标准层的 Ti 元素频率分布直方图
Fig. 6 Histogram of Ti in mudstone of Wangfu fault depression

表2 王府断陷火石岭组流纹质火山岩 Gd 和 Ti 元素校正量数据表

Table 2 Gd and Ti element correcting values of rhyolitic volcanics in Huoshiling Formation, Wangfu fault depression

| 井号 | CS7 | CS14 | CS9 | WF1 | CS12 | CS13 | CS10 | CS4 |
|--------|-----|--------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| Gd 校正量 | 0 | 0 | -1.5 | 0 | 0 | -0.5 | 0 | 0 |
| Ti 校正量 | 0 | -0.005 | +0.02 | +0.01 | 0 | +0.01 | 0 | +0.02 |

3 流纹质火山岩地层对比结果

研究区钻遇火石岭组流纹质火山岩的井中进行 ECS 测井的有 8 口井, 即 CS7、CS14、CS9、WF1、CS12、CS13、CS10、CS4 井。依据各井中的沉火山碎屑岩和风化壳将流纹质火山岩划分为不同的段。其中 CS7、CS9、WF1、CS12、CS4、CS10 井发育一段流纹质火山岩, CS14 井发育三段流纹质火山岩, CS13 井发育二段流纹质火山岩。根据分段结果将 ECS 测井资料中 Gd、Ti 数据与各段流纹

质火山岩对应。对流纹质火山岩作交汇图 (图 7), 交汇图中可见 4 个分区, 即可识别出 4 个火山地层单元, 由于 CS7 和 CS13 井从构造位置上看位于断陷南北二侧 (图 1B), 从火山岩厚度上看 CS13 井比 CS7 井厚, 因此将 CS7 与 CS13-1 二段流纹质火山岩划分为 2 个地层单元, 最终将 4 个火山地层单元划分为 5 个火山地层单元。从下到上从左到右依次为火山地层单元 A、火山地层单元 B、火山地层单元 C、火山地层单元 D、火山地层单元 E。

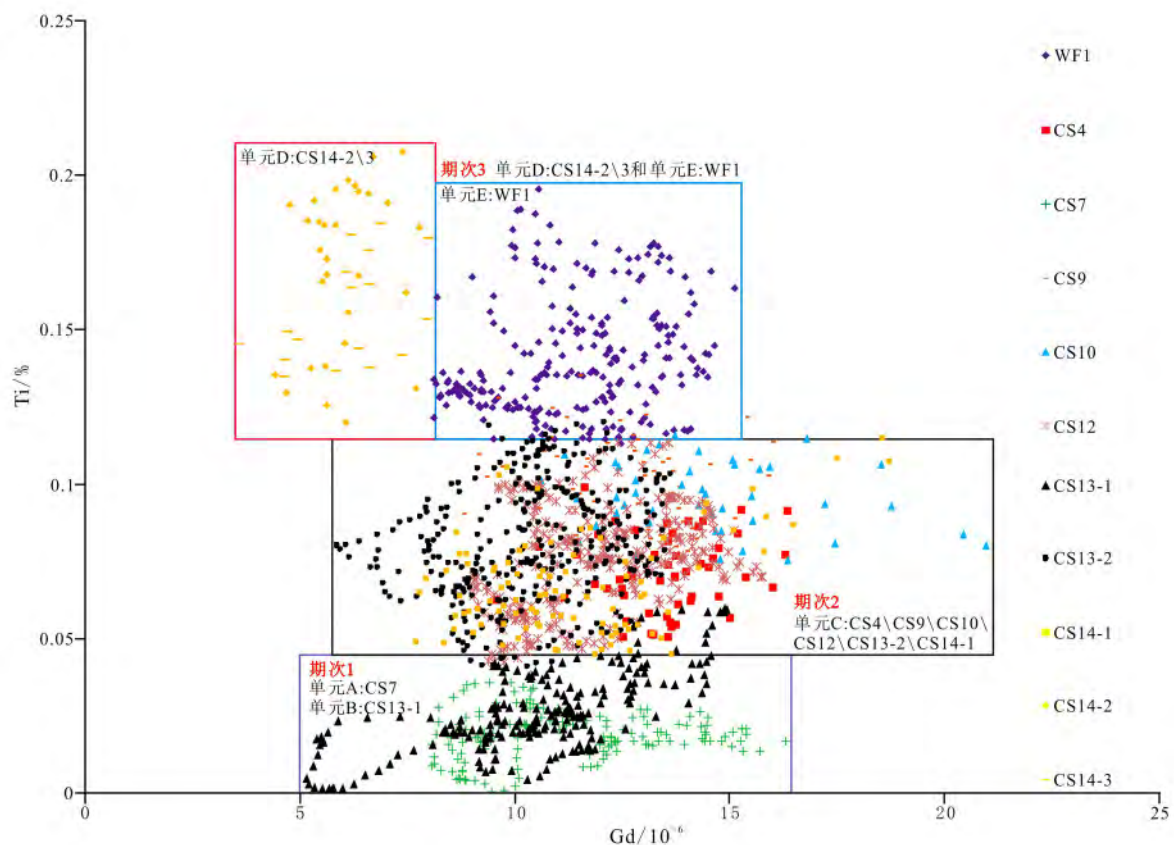


图7 王府断陷火石岭组流纹质火山岩不相容元素 Gd、Ti 特征和期次划分

Fig. 7 Characteristics of incompatible elements Gd and Ti of rhyolitic volcanics in Huoshiling Formation, Wangfu fault depression

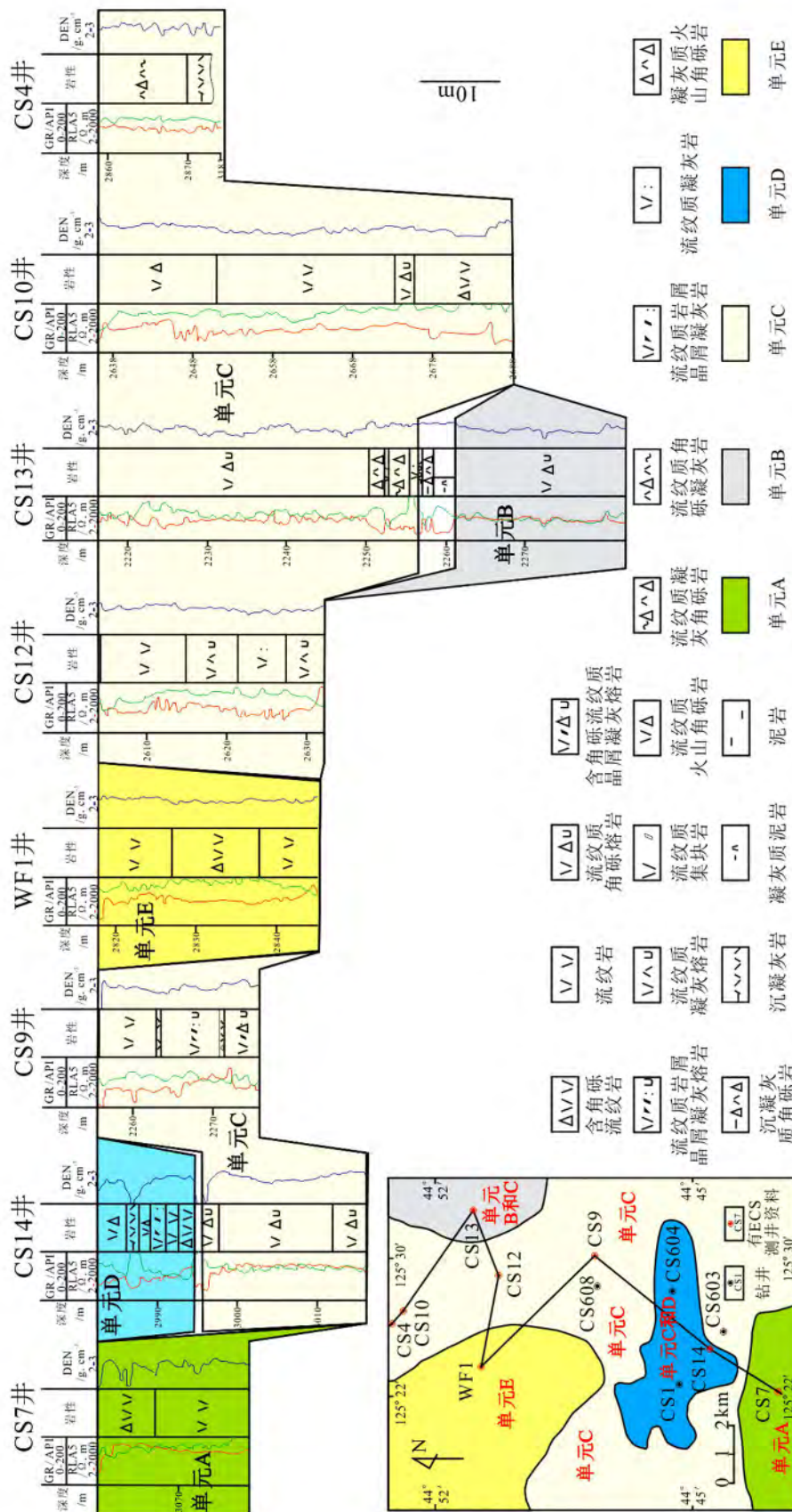


图 8 王府断陷火山组流纹质火山地层喷发期次连井对比剖面
Fig.8 Eruptive stage section of rhyolitic volcanostratigraphy in Huoshiling Formation, Wangfu fault depression

4 讨论

4.1 地层元素测井 (ECS) 中不相容元素划分期次

通过对 CS14 和 CS13 井的分析发现, CS14 井火石岭组流纹质火山岩层段中间存在风化壳, 表明火山活动过程中存在间歇, 可划分为 2 期。CS13 井火石岭组流纹质火山岩层段中间存在一定厚度的沉火山碎屑岩夹层, 同理可划分为 2 期。结合地层的新老关系及不相容元素的含量可知, CS14 和 CS13 井均揭示 Ti 元素变化特征是上伏层段 (晚喷发期) 含量高, 而 Gd 元素没有明显的变化。从图 7 中可见, 各火山地层单元 (A、B、C、D、E) 之间 Gd 元素含量范围无明显的差异, Ti 元素含量范围差异较大, 对划分火山岩期次起着决定性的作用。火山地层单元 A 和 B 不相容元素特征相同, 可划分为同一期次。而火山地层单元 D 和 E 在交汇图中, Gd 元素含量范围存在一定的差异, 但 Ti 元素含量范围差异不明显, 由于 Gd 元素作用小, 对期次划分约束作用也小, 故将火山地层单元 D

和 E 合并为一个期次。综上, 根据 Ti 元素含量的高低最终将识别出的 5 个火山地层单元划分为 3 个期次, 其中火山地层单元 A 和 B 为期次 1, 火山地层单元 C 为期次 2, 火山地层单元 D 和 E 为期次 3。

对研究区 8 口井由南到北制作连井剖面 (图 8), 图 8 左下角小图中火山地层单元据 (图 1B) 流纹质火山岩厚度圈定。根据交汇图中火山地层对比及期次划分的结果, 在连井剖面中按叠置关系将相同火山地层单元连在一起, 从图 8 中可以看出期次在整体上从南到北叠置迁移变化, 其中期次 1 喷发强度较弱, 期次 2 大规模喷发且喷发强度剧烈, 期次 3 零星喷发, 喷发强度较弱。

4.2 地层元素测井 (ECS) 中不相容元素划分火山岩喷发期次的适用性

不相容元素具有 3 个特征: ①不相容元素的含量与岩浆源有关, 随着岩浆上升演化不相容元素是逐渐富集的, 元素含量越高代表喷发时间越晚, 元素含量越低代表喷发时间越早, 元素特征相同为同

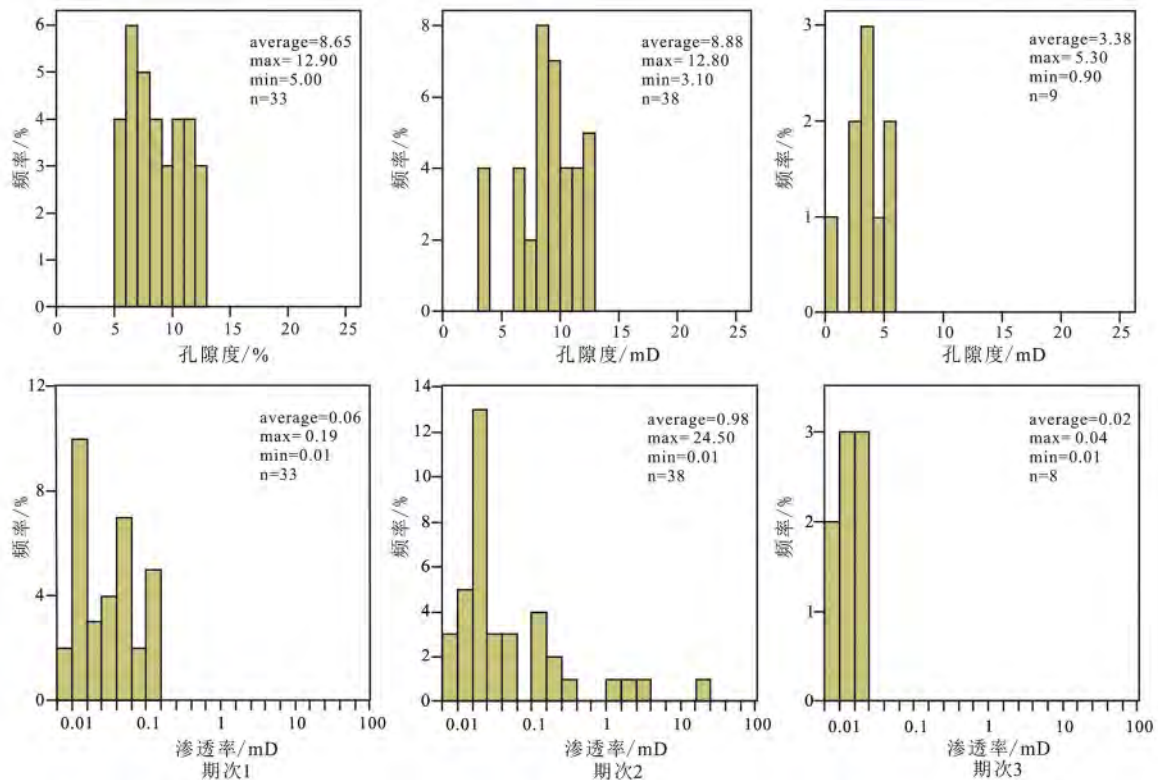


图 9 王府断陷火石岭组流纹质火山地层各期次实测孔隙度、渗透率频率分布直方图

Fig. 9 Frequency distribution histograms of each rhyolitic volcanic stratigraphy stage's measured porosity and permeability in Huoshiling Formation, Wangfu fault depression

一期次,特征不同为不同期次;②火山喷发后、成岩后稳定性好,通常不受埋藏、溶蚀和浅变质作用的影响;③同一地区同一时间的现代火山喷发物不相容元素特征多数相似。不相容元素的特征决定了它对火山岩期次划分的适用性,也就是说该方法适用于具有相同岩浆源、处于同一地区的火山岩,不同地区是否适用还需要进一步研究。

4.3 流纹质火山岩喷发期次与储层物性的关系

王府断陷火山熔岩和火山角砾岩储层物性较好^[26],但是不同期次具有较大的差别,对研究区3个期次80个实测孔隙度、渗透率数据制作孔隙度、渗透率频率分布直方图(图9),通过对比分析,期次2孔隙度、渗透率具有较大的分布范围,平均值高,储层物性最优;期次1储层物性次之;期次3储层物性较差。

5 结论

(1) 利用Gd、Ti两种不相容元素交汇图并结合连井剖面对比在松辽盆地南部王府断陷流纹质火山岩层段识别出5个火山地层单元,并划分为3个喷发期次。

(2) 王府断陷火石岭组流纹质火山岩层段3个喷发期次中,期次2孔隙度、渗透率分布范围较大,平均值高,储层物性最优,期次1储层物性次之,期次3储层物性较差。建议将该层段火山岩中的期次2作为勘探重点。

参考文献:

- [1] 王璞珺,衣健,陈崇阳,等. 火山地层学与火山架构:以长白山火山为例[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2013,43(2):319-339.
WANG Pu-jun, YI Jian, CHEN Chong-yang, et al. Volcanostratigraphy and volcanic architecture of the Changbaishan volcanos, NE China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(2): 319-339.
- [2] 程日辉,李飞,沈艳杰,等. 火山岩地层地震反射特征和地震-地质联合解释:以徐家围子断陷为例[J]. 地球物理学报,2011,54(2):611-619.
CHENG Ri-hun, LI Fei, SHEN Yan-jie, et al. The seismic reflection features of volcanic stratum and the seismic-geological interpretation: the case study in Xujia-wei faulted depression, Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 611-619.
- [3] 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 Hua-feng, SUN Hai-bo, GAO You-feng, et al. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundary and its signification of reservoirs [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(5): 1320-1329.
- [4] 衣健,王璞珺,李瑞磊,等. 松辽盆地断陷层系地震火山地层学研究:典型火山岩地震相与地质解释模式[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2014,44(3):715-729.
YI Jian, WANG Pu-jun, LI Rui-lei, et al. Seismic volcanostratigraphy of the Songliao Basin, Early Cretaceous: typical volcanic seismic facies and geological interpretation pattern [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(3): 715-729.
- [5] 衣健,王璞珺,唐华风,等. 火山地层界面的地质属性、地质内涵和储层意义:以中国东北地区中生代-新生代火山岩为例[J]. 石油学报,2015,36(3):324-336.
YI Jian, WANG Pu-jun, TANG Hua-feng, et al. Geological property, geological connotation and reservoir significance of volcanostratigraphic boundary: a case study of the Mesozoic & Cenozoic volcanic rocks in northeastern China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 324-336.
- [6] Tang H F, Phiri C, Gao Y F, et al. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundaries and their oil-gas reservoir significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(1): 163-174.
- [7] 唐华风,李瑞磊,吴艳辉,等. 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束[J]. 地球物理学报,2011,54(2):620-627.
TANG Hua-feng, LI Rui-lei, WU Yan-hui, et al. Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 620-627.
- [8] 胡治华,申春生,刘宗宾,等. 渤海湾盆地火山岩喷发旋回和期次研究的方法及应用[J]. 油气地球物理,2013,11(2):30-33.

- HU Zhi-hua, SHEN Chun-sheng, LIU Zong-bin, et al. The research method and application of the volcanic rock eruption cycle and stage in the Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geophysics*, 2013, 11 (2): 30-33.
- [9] 区域地质矿产地质司. 火山岩地区区域地质调查方法指南 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 303.
Bureau of Regional Geology and Mineral Resources. Guide to regional geology survey in volcanic rocks covered area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 303.
- [10] 谢家莹. 试论陆相火山岩区火山地层单位与划分: 关于火山岩区填图单元划分的讨论 [J]. *火山地质与矿产*, 1996, 17 (3): 85-94.
XIE Jia-ying. Approach to volcanic stratigraphic unit and its division in continental volcanic terrain [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 1996, 17 (3): 85-94.
- [11] 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*, 2008, 37 (6): 1183-1191.
HUANG Yu-long, WANG Pu-jun, MEN Guang-tian, 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.
- [12] 罗权生, 聂朝强, 文川江, 等. 新疆三塘湖盆地牛东地区卡拉岗组火山旋回和期次的划分与对比 [J]. *现代地质*, 2009, 23 (3): 515-522.
LUO Quan-sheng, NIE Chao-qiang, WEN Chuan-jiang, et al. Division and correlation of volcanic eruptible gyration and period of Kalagang Formation in Niudong Area, Xinjiang [J]. *Geoscience*, 2009, 23 (3): 515-522.
- [13] 司学强, 王鑫, 陈薇, 等. 三塘湖盆地玛朗凹陷哈尔加乌组火山岩旋回与期次划分 [J]. *地质科技情报*, 2012, 31 (6): 74-79.
SI Xue-qiang, WANG Xin, CHEN Wei, et al. Division of volcanic cycles and stages of the Haerjiawu Formation in Malang Depression, Santanghu Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31 (6): 74-79.
- [14] 王玲, 靳久强, 张研. 松辽盆地徐家围子断陷营城组一、三段火山喷发期次划分及意义 [J]. *中国石油勘探*, 2009, 14 (2): 6-13.
WANG Ling, JIN Jiu-qiang, ZHANG Yan. Division of volcanic eruption periods of the first and third members of Yingcheng Formation in Xujiaweizi fault depression in Songliao Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14 (2): 6-13.
- [15] 唐华风, 边伟华, 王璞珺, 等. 松辽盆地地下白垩统营城组火山岩喷发旋回特征 [J]. *天然气工业*, 2010, 30 (3): 35-39.
TANG Hua-feng, BIAN Wei-hua, WANG Pu-jun, et al. Characteristics of volcanic eruption cycles of the Yingcheng Formation in the Songliao Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30 (3): 35-39.
- [16] 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩与玄武岩的成因联系 [J]. *长春科技大学学报*, 2000, 30 (4): 322-328.
LIN Qiang, GE Wen-chun, SUN De-you, et al. Genetic relationships between two types of mesozoic rhyolite and basalts in Great Xing'an Range [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2000, 30 (4): 322-328.
- [17] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究 [J]. *地球科学*, 2000, 25 (2): 172-178.
GE Wen-chun, LIN Qiang, SUN De-you, et al. Geochemical research into origins of two types of mesozoic rhyolites in Daxing'anling [J]. *Earth Science*, 2000, 25 (2): 172-178.
- [18] James E S, Omole O, Diedjomahor J, et al. Calibration of the elemental capture spectroscopy tool using the niger delta formation [R]. *Society of Petroleum Engineers*, 2007.
- [19] 袁祖贵, 楚泽涵. 一种新的测井方法 (ECS) 在王庄稠油油藏中的应用 [J]. *核电子学与探测技术*, 2003, 23 (5): 417-423.
YUAN Zu-gui, CHU Ze-han. The application of elemental capture spectroscopy (ECS) logging in Wangzhuang heavy oil reservoirs [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2003, 23 (5): 417-423.
- [20] 袁祖贵, 成晓宁, 孙娟. 地层元素测井 (ECS): 一种全面评价储层的测井新技术 [J]. *原子能科学技术*, 2004, 38 (增刊1): 208-213.
YUAN Zu-gui, CHENG Xiao-ning, SUN Juan. ECS: New well-logging technique for completely evaluating the

- reservoir [J]. *Atomic Energy Science & Technology*, 2004, 38 (Suppl. 1): 208-213.
- [21] 袁祖贵. 用地层元素测井(ECS)资料研究沉积环境 [J]. *核电子学与探测技术*, 2005, 25 (4): 347-352.
- YUAN Zu-gui. Using elemental capture spectroscopy (ECS) data to study depositional environment [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2005, 25 (4): 347-352.
- [22] 谢国梁, 沈玉林, 赵志刚, 等. 西湖凹陷平北地区泥岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *地球化学*, 2013, 42 (6): 599-610.
- XIE Guo-liang, SHEN Yu-lin, ZHAO Zhi-gang, et al. Distribution characteristic and geological significance of rare earth and trace elements of mudstone of Pingbei area in Xihu Depression [J]. *Geochimica*, 2013, 42 (6): 599-610.
- [23] 韩登林, 李忠, 李双应, 等. 鲁西隆起北侧博兴洼陷古近系泥岩地球化学特征及其构造意义 [J]. *地质科学*, 2007, 42 (4): 678-689.
- HAN Deng-lin, LI zhong, LI Shuang-ying, et al. Geochemical characteristics of Paleogene mudstones in the Boxing Sag North of the West Shandong rise and their tectonic implications [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42 (4): 678-689.
- [24] 李双建, 王清晨. 库车坳陷第三系泥岩地球化学特征及其对构造背景和物源属性的指示 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25 (3): 219-229.
- LI Shuang-jian, WANG Qing-chen. Geochemical characteristics of Tertiary mudstones in Kuqa depression and their implications to tectonic setting and provenance attribute [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25 (3): 219-229.
- [25] 李珉, 牛志军, 赵小明, 等. 鄂西地区泥盆系—石炭系泥质岩沉积地球化学特征及沉积环境研究 [J]. *华南地质与矿产*, 2011, 27 (3): 238-249.
- LI Min, ZHU Zhi-jun, ZHAO Xiao-ming, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Devonian and Carboniferous mudstones in western Hubei Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2011, 27 (3): 238-249.
- [26] 王茂汀, 程日辉, 徐洪明, 等. 王府气田火山岩储层的孔渗特征及评价 [J]. *世界地质*, 2015, 34 (4): 1061-1068.
- WANG Mao-ting, CHENG Ri-hui, XU Hong-ming, et al. Porosity and permeability characteristics and evaluation of volcanic rock reservoirs in Wangfu gas field [J]. *Global Geology*, 2015, 34 (4): 1061-1068.