https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.236



# 海拉尔盆地侏罗系火山-沉积岩 地震识别和岩相古地理重建

吴海波<sup>1</sup>,王国臣<sup>1</sup>,侯艳平<sup>1\*</sup>,史冠中<sup>2,3</sup>,贾甄甄<sup>1</sup>,彭 威<sup>1</sup>,张海军<sup>1</sup>

1. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江大庆 163712

2. 中国地质大学教育部构造与油气资源重点实验室,湖北武汉 430074

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘 要:海拉尔盆地侏罗系塔木兰沟组火山岩显示有巨大油气勘探潜力.海拉尔盆地内侏罗系"塔木兰沟组"火山喷发期次和 岩相分布尚不清楚,制约了盆内火山岩型油气藏勘探部署.针对海拉尔盆地火山岩相复杂且相变快,火山机构类型多样等特 点,通过野外露头调查、年代学资料和单井和连井地震对比,利用地震剖面、时间切片、三维可视化和均方根振幅属性提取等技 术,对盆内各个凹陷开展火山一沉积岩识别、旋回划分和岩相古地理恢复.野外露头、测井、地震反射、火山岩U-Pb年代学等证 据都表明海拉尔盆地侏罗系发育2期火山一沉积旋回.火山喷发沉静期于火山机构外围发育沉积岩夹层,在地震剖面上形成 的连续反射且可区域追踪对比,可以作为旋回划分依据.利用均方根振幅属性对岩性敏感特性来勾勒火山机构和外围的沉积 岩.盆内第1期火山一沉积旋回岩以中基性火山岩、酸性火山岩和沉积岩为特征,对应于盆地外围的塔木兰沟组.第2期火山 一沉积旋回岩以酸性火山岩和沉积岩为主,对应于盆地外围的玛尼吐组.盆内西部凹陷带主要发育火山机构和裙边砂砾岩 体,中部和东部凹陷带主要发育湖相砂岩和泥岩.各个凹陷内火山机构主要集中在盆地或斜坡带,侏罗系火山一沉积发育具 有明显的火山一断陷湖盆特征,与区域上额尔古纳和德尔布干断裂空间展布关系密切.

关键词:火山机构;地震相识别;古地理重建;海拉尔盆地;侏罗系;石油地质.
中图分类号: P631.4
文章编号: 1000-2383(2022)08-3056-17
收稿日期:2021-09-08

# Seismic Identification of the Jurassic Volcano-Sedimentary series in the Hailar Basin and Lithofacies Palaeogeography Reconstruction

Wu Haibo<sup>1</sup>, Wang Guochen<sup>1</sup>, Hou Yanping<sup>1\*</sup>, Shi Guanzhong<sup>2,3</sup>, Jia Zhenzhen<sup>1</sup>, Peng Wei<sup>1</sup>, Zhang Haijun<sup>1</sup>

1. Exploration and Development Institute of Daqing Oilfield Co Ltd., Daqing 163712, China

Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Jurassic volcanic rocks of the Tamulangou Formation show great potential for oil and gas exploration, but it is not clear that the volcanic eruption cycles and paleogeography of the Tamulangou Formation, which restricts the exploration for volcanic reservoirs in the basin. Considering the complicated volcanic facies that are often fast changed and various volcanic edifices, this

**Citation**: Wu Haibo, Wang Guochen, Hou Yanping, Shi Guanzhong, Jia Zhenzhen, Peng Wei, Zhang Haijun, 2022. Seismic Identification of the Jurassic Volcano–Sedimentary series in the Hailar Basin and Lithofacies Palaeogeography Reconstruction. *Earth Science*, 47(8): 3056–3072.

基金项目:国家科技重大专项课题(No. 2016E-0202).

**作者简介:**吴海波(1965-),男,教授,主要从事油气勘探研究工作.ORCID:0000-0002-4872-6308. E-mail:wuhaib@petrochina.com.cn \***通讯作者:**侯艳平,ORCID:0000-0003-2726-8579. E-mail:houyanping@petrochina.com.cn

**引用格式:**吴海波,王国臣,侯艳平,史冠中,贾甄甄,彭威,张海军,2022.海拉尔盆地侏罗系火山一沉积岩地震识别和岩相古地理重建.地球科学,47(8):3056-3072.

paper comprehensively analyzes outcrop investigation, volcanic U-Pb geochronology, drilling and logging, and seismic data, and uses the technology of seismic reflection features, time slice, three-dimensional visualization and Mean Square Root Amplitude property to identify volcano-sedimentary series, volcanic eruption cycles and lithological paleogeography of each sag in Hailaer Basin. These lines of evidence suggest that Jurassic rocks in Hailaer Basin developed two sets of volcanic-sedimentary cycles. Sedimentary beds that deposited outside volcanic edifices during the intermittent period of volcanic eruptions are used as mark beds to regionally recognize eruption cycles due to the continuous reflections formed on the corresponding seismic profile. The Mean Square Root Amplitude that is sensitive to lithology is used to outline volcanic edifices and their surrounding sedimentary beds. The first volcanic-sedimentary cycle is characterized by mafic to acidic volcanic rocks and sedimentary intervals that correspond to the Tamulangou Formation outside of the basin. The second volcanic-sedimentary cycle is characterized by acidic volcanic rocks and sedimentary intervals, corresponding to the Manitu Formation outside of the basin. The western depression zone mainly develops volcanic edifices and volcanic-sedimentary aprons at the edges of the volcanic edifices. The central and eastern depression zones mainly develop lacustrine sandstone and mudstone. The volcanic edifices inside sags are mainly concentrated in the basin floor or slope zone. The Jurassic volcanic-sedimentary rocks in the Hailar Basin shows typical characteristics of fault-control lake basins, and the Erguna and Deerbugan fault zones in the region greatly influence the distribution of volcanic-sedimentary rocks.

Key words: Volcanic edifice; seismic facies identification; palaeogeography reconstruction; Hailar Basin; Jurassic; petroleum geology.

火山岩地层结构复杂、横向变化块,具有多旋 回性,导致火山机构识别、旋回划分、岩相和沉积相 空间展布和储层预测成为火山岩油气藏勘探中的 重点和难点问题(朱红涛等,2014).火山岩地震相 特征识别,就是通过对常规地震数据体进行多方位 的浏览对比,识别火山岩相.诸多学者提出具有特 色的火山岩地震识别技术和旋回划分方法(衣健 等,2014;冯玉辉等,2016;张姣等,2018;夏茂龙等, 2020).利用地震数据体识别火山机构的技术目前 主要有地震分频成像技术、地震剖面和时间切片三 维可视化识别、波形聚类分析进行火山岩相带划分 技术、井震联合波形指示反演技术、地震多属性融 合成像技术等(Avseth et al., 2001; Christorpher, 2002; 于晶等, 2010; 陈广馨, 2018; 李道清等, 2020),这些地震识别技术主要依靠高品质地震反 射资料和有一定的勘探基础的工区中展开.

近年来在松辽盆地、二连盆地、准噶尔盆地等 火山岩勘探中获得的重大突破表明火山岩油气藏 具有重要得勘探开发潜力(邹才能等,2008;路占军 等,2011;马尚伟等,2018;周翔等,2019).突泉盆地 侏罗系万宝组发现油斑、油迹(李世臻等,2015;孙 雷等,2019),突D1井揭示侏罗系存在油气显示(苏 飞等,2017).二连盆地侏罗系地层的钻井也部分显 示低产油流(汪生秀等,2012).在海拉尔盆地内钻 遇侏罗系地层的36口井中有10口井有油气显示 (贾进华等,2021).因此,海拉尔盆地侏罗系深层成 为油气勘探新领域,侏罗系火山一沉积地层是潜在 的油气勘探和开发的有利目的层系.在海拉尔盆地 早期的勘探实践中,侏罗系地层被统一命名为"塔 木兰沟组"或"兴安岭群",与盆地外围的侏罗系地 层命名方式以及具体的岩石组合缺乏比对,这一方 面制约了盆地内侏罗系岩石地层格架的建立,另一 方面影响了岩相、沉积相分析,从而影响盆地内侏 罗系的勘探部署.海拉尔盆地钻井资料有限,多数 钻井未钻穿侏罗系,难以仅依靠井一震对应建立可 靠的火山岩相特征.盆地内地震资料丰富,除乌固 诺尔一莫达莫吉凹陷、旧桥凹陷外都有2维地质资 料,红旗凹陷和乌尔逊凹陷等重点工区也被高品质 3维地震资料覆盖,可保证盆内火山一沉积岩识别 与对比.

本文针对海拉尔盆地火山岩相复杂且相变快, 火山机构类型多样等特点,通过野外露头调查、单 井和连井的岩性、测井对比、结合地震和年代学资 料,应用火山地层学原理,综合运用地震剖面和时 间切片三维可视化和地震振幅属性提取等技术,对 整个盆地内各个凹陷开展火山一沉积岩识别、旋回 划分和岩相古地理恢复.

### 1 地质概况

海拉尔盆地位于中蒙边界东段,盆地整体呈 NNE向展布,面积为4.42×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,盆地是受太平 洋和鄂霍茨克洋俯冲构造的双重影响,在区域NE 向主干断裂产生位移基础上逐渐发展起来的中一 新生代陆相断陷湖盆(陈发景,1997;Graham *et al.*, 2001;Huang, 2019).盆地西侧为额尔古纳断裂带 和德尔布干断裂带,东侧为新林一喜桂图断裂带, 中间发育一系列与其平行及斜列的贯穿基底的断



图 1 内蒙古地区海拉尔盆地凹陷分布和岩性柱状图 Fig.1 Sag distribution and lithological histogram of Hailaer Basin, Inner Mongolia

裂.这些断层将盆地划分为"东西分带,南北分块"、 "两隆三坳"的构造格局,即嵯岗隆起、巴彦山隆起 以及10个凹陷盆地(图1).盆内断层以NE向为主, 与少量南北向和北东东向犁式正断层共同控制了 隆坳展布.海拉尔盆地基底岩性复杂,主要由前侏 罗纪的深变质岩、浅变质岩及岩浆岩组成(陈均亮 等,2007;纪文婷,2019).

海拉尔盆地外围发育多期晚中生代火山岩,盆 地西侧塔木兰沟组中一基性岩石以及流纹岩Ar-Ar 和锆石U-Pb年龄范围为164~147 Ma(陈志广等, 2006;李萍萍等,2010).海拉尔盆地内部与周缘的 火山岩对比研究主要通过岩石地层组合特征,导致 不同喷发年龄的岩石被划入同一地层单元,火山岩 地层划分与命名存在诸多争议(杨爱雪,2016;范彦 文,2017).根据海拉尔盆地周缘和盆内钻井揭示的 地层层序和年龄,本研究将海拉尔盆地侏罗系进行 了重新梳理.海拉尔盆地主要发育中上侏罗统塔木 兰沟组和玛尼吐组,下伏地层为变质基底和三叠系 地层(图1).塔木兰沟组地层为中基性火山岩、酸性 火山岩和沉积岩,可以分为3部分:下部主要以酸性 火山岩为主,包括流纹质角砾熔岩和流纹质凝灰熔 岩,夹中基性火山岩;中部发育沉积岩,主要为凝灰 质砂砾岩、复成分砾岩、长石砂岩、粉砂岩、黑色泥 页岩等;上部以粗面安山岩和安山岩为主,含酸性 火山岩.玛尼吐组地层以酸性火山岩和沉积岩组合 为特征.下部发育泥岩和砾岩;上部以酸性火山岩 为主,主要为流纹岩、粗面质凝灰熔岩、流纹质(熔 结)角砾熔岩,夹少量安山岩.海拉尔盆地钻遇这些 侏罗系地层的钻井主要有赫1井、红6、红2、苏37-49井等,其中红6井位于海拉尔盆地红旗凹陷中南 部(图1),完钻深度大于3600m,钻穿了整个侏罗 系地层,常作为标准井开展盆内地层对比划分.统 计前人所做的大量火山岩定年数据资料确定塔木 兰沟组地层时代为165~155 Ma之间,与红6井2 909~2963 m发现晚侏罗世孢粉化石一致(Wan et al., 2020);玛尼吐组地层时代为154~145 Ma之间 (图 2a).

## 2 侏罗系火山-沉积旋回划分

#### 2.1 野外地质调查岩石学旋回划分

在海拉尔盆地西缘新巴尔虎右旗双骏牧场地 区实测地质剖面中,主要发育塔木兰沟组和玛尼吐 组火山岩.塔木兰沟组主要黑色致密玄武岩、红棕 色杏仁玄武岩、和黑色气孔状玄武岩.玛尼吐组岩





相变化较快,下部主要为含集块角砾凝灰岩、熔结 火山角砾岩、流纹斑岩、角砾状流纹岩、熔结凝灰岩 等,发育流纹及石泡构造.上部主要发育角砾熔结 凝灰岩、晶屑凝灰岩,具熔结结构与假流纹构造.火 山一沉积相主要以爆发相、溢流相、侵出相为主(图 3). 溢流相主要为塔木兰沟组气孔(杏仁)玄武岩、 块状玄武岩;侵出相的中心发育流纹斑岩,向外过 渡为流纹岩、石泡流纹岩(图4a),边缘多发育同源 角砾流纹岩.火山爆发相的近端为火山角砾岩、熔 结凝灰岩等,向远端过渡为含角砾岩屑凝灰岩,凝 灰岩(图4b). 沉积岩为灰白色凝灰质砂岩、砂砾岩、 凝灰质粉砂岩,发育交错层理和平行层理,主要发 育在远离火山口的斜坡部位(图4c).这些火山岩总 体可以划分为2期喷发活动,第1期为塔木兰沟组 溢流相,第2期为玛尼吐组火山爆发相.塔木兰沟组 和玛尼吐组界线附近可见火山碎屑岩中角砾为玄 武岩角砾(图4d),说明两者之间存在先后关系.

#### 2.2 盆内年代学证据

对盆内钻遇侏罗系火山岩的16口井岩心开展 锆石U-Pb年代学分析显示,盆内侏罗系火山活动 可以分为2期,峰期年龄分别为146 Ma和160 Ma, 与盆缘区的火山活动的年龄分布类似(图2b).平面 上,塔木兰沟组年龄主要分布在盆地的西部和中部 凹陷带,东部凹陷带主要发育玛尼吐组期火山岩. 因此,盆地内火山岩锆石U-Pb年代学统计也显示 存在2期火山喷发旋回.

#### 2.3 单井和地震反射分析

火山岩中岩相、成分、结构和构造出现周期性 变化,称为韵律.韵律一般由多层岩石组成,厚几米 至几十米.在韵律之上更大的周期性变化,称为旋 回.旋回常由多个韵律组合,厚几百米至几千米,旋 回之间常具有一定的间断,发育不整合或较厚的沉 积岩夹层.火山活动旋回是划分火山活动变化的层 序单元,具有规则性、规律性、同源性,它包含起始



图3 新巴尔虎右旗地区双骏牧场火山岩相和旋回野外调查地质图(位置见图1)

Fig.3 Geological survey map of volcanic facies and cycles of Shuangjun Ranch in the Xinbaerhu Youqi area (the location is shown in Fig.1)

期至高峰期、高峰期至衰退期、衰退期至休眠期的 整个过程,反映火山活动在时间上的演化序列.

研究表明,火山岩旋回划分标志主要有3个: 一是具有区域对比性的火山质沉积岩、沉凝灰岩夹 层;二是上下存在火山活动强度、岩性、岩相差异的 不整合面;三是火山岩具有明显叠置特征差异.同 时结合火山岩锆石U-Pb年龄,对单井岩心进行旋 回划分.以红6井为例(图4),侏罗系地层包含2个 火山-沉积旋回.最底部的厚度约150m的砂砾岩 和凝灰岩代表了塔木兰沟组火山-沉积旋回.该旋 回位于三叠系基底和年龄151Ma火山岩之间,地层 时代上可以与塔木兰沟组比对.岩性以砂砾岩为 主,代表塔木兰沟期未受到火山喷发扰动的沉积. 地震反射特征为低频杂乱-半连续反射,与砂砾岩 沉积相对应.其上厚约700m火山-沉积岩层,代 表了玛尼吐组火山-沉积旋回.该旋回时代上含有



图4 新巴尔虎右旗双骏牧场侏罗系火山岩野外调查典型图片

Fig.4 Photographs of typical Jurassic volcanic rocks in field geological survey of Shuangjun Ranch, Xinbaerhu Youqi area a. 流纹岩,图中近水平纹理即为典型的流纹构造,玛尼吐组;b. 流纹质火山角砾岩,主要为大小不等棱角状同源火山角砾,红色箭头指示典型角砾,玛尼吐组;c. 沉凝灰岩,发育斜层理,玛尼吐组;d. 流纹质火山碎屑岩,除酸性火山碎屑外,还包括下伏塔木兰沟组棱角状玄武岩碎屑(红色箭头),指示存在不整合

151 Ma酸性火山岩并位于127 Ma玄武岩之下,与 盆外玛尼吐组时代一致.岩性以酸性火山岩、火山 碎屑岩夹沉积岩为特征,与盆外玛尼吐组岩性特征 一致.地震反射特征为中频半连续一连续反射特 征,代表了层状火山碎屑岩和沉积岩特征.该旋回 顶部80 m厚层沉积岩代表了火山活动休眠期沉积, 分隔了上部梅勒图组火山一沉积旋回.上部玄武岩 和安山岩锆石年龄119~127 Ma,岩性和时代上可 以与盆外梅勒图组对应,代表了白垩系火山一沉积 旋回.

乌尔逊凹陷苏 37-49 井可以划分出 2 个火山-沉积旋回(图 6).下部旋回火山活动期发育英安质 凝灰岩、安山岩以及玄武粗面安山岩等,时代为 158 Ma.火山岩岩石组合和时代可以与盆外塔木兰沟组 比对;火山休眠期厚约 350 m 沉积代表了本次旋回 结束.火山岩自然伽马曲线形态较为平直,玄武粗 面安山岩和安山岩段、英安质凝灰岩段自然伽马平 均值为分别为 60 API和 119 API,沉积岩自然伽马 曲线形态波动较大,自然伽马(GR)值范围为 40~ 107 API之间,与上部旋回的曲线形态波动性存在 明显差别,可以作为区分标志.安山岩和凝灰岩段 表现为低频杂乱一半连续空白反射,沉积岩段表现 为中频连续过渡至半连续反射特征.地震发射特征 与可上部旋回的低频不连续反射形成对比.上部玄 武安山岩、安山岩和砾岩、泥岩、粉砂岩、粉砂质泥 岩代表了另一期旋回,测井曲线和地震反射特征存 在差异.

火山旋回界面首先根据单井火山一沉积旋回 和期次确定界面,然后在地震剖面寻找旋回界面对 应的同相轴或强反射面进行追踪(图7).对旋回界 面地震反射特征不明显区域,不同学者针对盆地内 火山岩旋回地震识别和划分问题提出了不同的技 术方案(冀国盛等,2002;黄玉龙等,2007;罗权生 等,2009;郝彬,2014;张亚波等,2018),然而受到地 震分辨率影响,实际分析中韵律和层等地层单元的 难以准确识别和追踪.地质时间尺度范围内火山喷 发活动属于事件性沉积,具有偶发性和节律性.由 于在火山喷发旋回之间通常会发生间断,火山间歇 期一般会形成一定厚度的沉积岩夹层或者构造活 动形成的风化、剥蚀等,存在不整合面或者风化壳,



图5 红旗凹陷红6井岩石组合、火山岩锆石U-Pb测年和地震反射特征旋回划分

Fig.5 The volcanic cycle division of the Hong 6 well and the corresponding lithological association, volcanic zircon U-Pb ages and seismic refection features in Hongqi Sag

且通常会形成岩相突变,导致每个旋回一般由火山 碎屑岩一熔岩一沉积岩组成.因此对无井或少井区 地震反射剖面则可以根据地震反射体的接触关系 (上超、下超、削截等),判断旋回和期次(图8).一些 复合火山机构区域,连续厚层沉积岩发育较少,难 以识别旋回界面.根据地震反射内部特征(连续性、 频率、强度),辅助顶部和周围断裂组合特征,根据 火山喷发相和沉积岩在火山机构发育模式为指导, 勾勒火山通道、碎屑岩楔状体和外围的沉积岩.以 勾勒出的沉积岩为标志层作为旋回界面.在火山口 附近常常形成巨厚的火山堆积物,使得火山口附近 海拉尔整个盆地内的火山-沉积旋回主要依 靠跨越盆地凹陷间的连井地震剖面完成,主要通过 钻井岩性的旋回划分和剖邻近同相轴变化趋势进 行追踪.以赫尔洪德-红旗-乌尔逊凹陷为例(图 9),通过赫1井、红6、红2、苏37-49等井的岩性旋回 划分,结合测试的火山岩锆石U-Pb年龄,确定对应 的塔木兰沟组和玛尼吐组,在地震剖面上寻找对应 的旋回反射界面和同相轴以实现不同凹陷间的旋 回追踪和对比.

综上所述,盆地外围和盆内侏罗系火山岩综合 考虑岩石学、锆石U-Pb年代学,岩性组合、测井和 地震反射等划分出2个火山-沉积旋回,它们分别



图 6 乌尔逊凹陷苏 37-49 井岩石组合、自然伽马测井与地震反射特征旋回划分

Fig.6 The volcanic cycle division of the Su37-49 well and the corresponding lithological association, natural gamma logging and seismic refection features in Wuerxun Sag

对应于塔木兰沟组和玛尼吐组.通过连井地震对 比、无井区地震剖面解释和跨凹陷连井地震剖面综 合对比和追踪,从而实现整个盆地的火山一沉积地 层划分. 3 火山岩相地震识别方法

## 3.1 侏罗系火山机构发育特点

由于海拉尔盆地揭露侏罗系火山岩钻井较少, 需要借助盆缘区同时代火山岩地层发育建立火山 机构基本特征,以增加地震相识别的准确性.野外 观察显示,海拉尔地区主要发育3类火山机构类型.



图7 红旗凹陷连井三维地震剖面火山岩旋回界面识别

Fig.7 Identification of the volcanic cycle interface through three-dimensional seismic-well correlation section in Hongqi Sag 白色虚线显示旋回界面,红色箭头代表削截接触关系



图 8 红旗凹陷无井二维地震剖面火山岩旋回界面识别

Fig.8 Identification of the volcanic cycle interfaces through non-well two-dimensional seismic section in Hongqi Sag 白色虚线显示旋回界面,红色箭头代表削截接触关系,黑色虚线圈闭代表丘状火山机构

第1类为火山穹隆,表现为花岗斑岩、流纹斑岩构成 的直径1~3km的呈蘑菇状分布的火山岩筒,外围 常发育火山碎屑岩和凝灰质砂岩;这类火山机构主 要分布在新巴尔虎右旗一带(图3、图10a,10b, 10c);第2类是破火山口,原火山喷发锥体陷落形成 负地形,沉积由细粒沉积物与凝灰岩互层构造的沉 积盖层,破火山口附近也可发育流纹斑岩等囊状、 透镜状地质体(图10d,10e);这类火山机构在呼伦 湖西岸和满洲里南一带分布较多;第3类是席状玄 武岩夹辉绿岩侵入体,玄武岩层常含有蚀变沉积岩 夹层(图10f);这类火山类型仅见于呼伦湖西岸拴马 桩一带.此外,新巴尔虎右旗一带以酸性火山为主, 且多表现为小型火山岩筒或火山支脉,具有多中心 弥散式喷发特点,缺乏火山中心直径达数十公里的 大型火山机构.满洲里南部火山机构显示不同的特 点,显示有围绕单个大型火山机构中心式喷发特 点.盆地外围火山喷发具有明显复式喷发特点,酸 性火山岩碎屑中常夹杂玄武岩等中基性岩碎屑,这 些特点与统计的火山岩年龄存在2期大的火山喷发 相对应.以上盆缘区火山地层观察形成了盆内火山





岩识别的约束条件,即:(1)多中心弥散喷发主要分 布在盆地西部一带,中心式喷发主要发育在盆地中 部;(2)火山机构有3种主要类型,沉积岩主要分布 在火山机构外围或与玄武岩互层;(3)盆地内存在2 个火山喷发旋回岩石组合.

#### 3.2 火山岩相地震识别

3.2.1 地震反射特征 火山岩相地震反射特征是 建立在岩相界面井震标定基础上,提取各类火山岩 相地震反射识别标志和属性特征,然后运用识别标 志和属性特征对无井区地震资料进行岩相识别.海 拉尔盆地各凹陷覆盖三维和二维地震资料,虽然已 有文献报道火山岩地震反射特征,然而受火山机构 分布差异和地震资料质量限制,需要根据每个凹陷 地震钻测井数据构建各自凹陷的地震相识别标志 (图11).通过对盆内6口井钻测井资料与地震资料 的结合对比,总结火山机构岩相和对应的地震反射 特征,包括振幅、频率、连续性等.火山熔岩,高密度 热碎屑流一般为高振幅;细火山灰泥,一般表现为 低振幅.靠近火山机构频率高且横向变化大,远离 火山机构则频率变化稳定,火山岩常为低频特征. 中基性火山岩具有熔浆黏度低、喷发期次多、纵向 相变较快等特点,在钻井上多呈薄(互)层产出,且 岩体多呈低平火山岩隆起,表现为中一低频、连 续一半连续反射.水平切片是三维地震特有,每张 切片代表地下不同层位信息在同一时间的反映,它 相当于某一时间面的地质图,如反射振幅强弱、频 率高低、信噪比变化、断层分布等.在水平切片上, 火山机构的边缘显示强振幅反射,而在火山机构中 心相则显示杂乱反射,表现为白色或者黑白相间的 杂色.

在地震剖面中判断识别火山机构有下列几点 依据:(1)火山通道在地震剖面中识别特征为基底 向上的颈状杂乱反射;(2)在火山岩体中可以识别 出顶部凸起的爆发相向两侧逐渐尖灭,爆发相通常 在火山口厚度较大向周围变薄,所以通常来说爆发 相厚的地方代表火山口的位置;(3)在地震剖面中,



图 10 海拉尔盆地周缘典型火山机构火山岩野外露头观察 Fig.10 Typical volcanic photographs of volcanic edifice in the periphery of Hailaer Basin a. 火山中心相外带发育浅侵安山岩,发育扇形柱状节理,新巴尔虎右旗;b. 火山中心相内带(火山岩筒)的流纹斑岩,新巴尔虎右旗;c. 火山爆 发相角砾岩,火山角砾包括火山同源角砾和围岩沉积岩角砾,新巴尔虎右旗;d. 垮塌火山口附近的流纹岩和内部沉积的凝灰质粉砂岩;e. 满洲 里南;f. 灰绿、紫红色渣状玄武岩,下部紫红色为砂岩,呼伦湖西岸拴马桩

由于火山口部位厚度较大,上覆地层沉积时可以发 现超覆点;(4)火山通常以基底断裂作为通道,所以 火山口经常分布在断裂附近或断裂交叉的地方; (5)火山机构在地震剖面上锥体丘状反射特征明 显,提取的均方根振幅横向变化快,波动大.三维可 视化识别火山机构的特征为时间切片振幅范围自 下向上由大变小且内部杂乱,相干体切片上反映局 部呈环状,内部杂乱,这都可以作为火山机构的 证据.

**3.2.2 均方根属性特征** 地震属性分析是通过对比 地震资料中地球物理参数与地质属性等的相关程度

进行分析,以此寻找能够表征地质属性特征参数的过程(Hardage et al.,1996;Cooke et al.,1999;梁中宁和李宁,2019).通过对比多种地震属性切片,发现均方根振幅属性对火山岩岩相识别具有较好的指导作用.因此利用均方根振幅属性对岩性敏感特点,进一步限定和勾勒出火山机构和外围沉积岩(图12).经过对比各个凹陷三维地震均方根属性平面,本研究发现25 ms时窗的属性识别较好,粉砂岩和泥岩区域表现为高亮反射;火山角砾岩、砂砾岩表现为红色低能量反射;火山机构中心相(流纹岩、火山角砾岩)表现为高亮和暗红色斑驳分布的特征,以此为依据精细编修岩相的平

红旗凹陷火山一沉积岩地震相识别特征						
	岩性	玄武岩	火山碎屑岩	流纹岩	砂砾岩	泥岩/粉砂岩
	实例					
	反射 特征	中 低 频 、 强 振 幅, 高反射强度 连续性较好振幅 属性高亮特征	中高频、中等振 雨,中高反射强 度,平坦席状连 续性较好	中低频、中强振 幅, 丘状断续反 射特征	中低频、中低振 幅,低能量空白 断续反射,振幅 属性暗淡	中高频、中等振 幅,中高强度连 续席状反射,侧 向连续性好
	岩相	溢流相	爆发相	火山通道相	扇三角洲	浅一半深湖
乌尔逊凹陷火山一沉积岩地震相识别特征						
	岩性	玄武岩	火山碎屑岩	流纹岩	砂砾岩	泥岩/粉砂岩
	实例					
	反射 特征	中 低 频 、 强 振 幅,高反射强度 连续性较好,振 幅属性中一低亮 特征	中高频、中等振 中低反射强 度,平坦席状连 续性较好,振幅 属性灰暗	中低频、中强振 幅,丘状断续反 射特征	中低频、中低振 幅,低能量空白 断续反射,振幅 属性暗淡	中低频、中等振 幅,中低反射强 度,透镜状侧向 连续性一般
	岩相	溢流相	爆发相	火山通道相	扇三角洲	浅一半深湖

图 11 红旗凹陷和乌尔逊凹陷火山一沉积岩地震相识别特征

Fig.11 Representative seismic reflection features of volcano-sedimentary rocks in Hongqi and Wuerxun sags 白色虚线内展示地质体外部几何和内部反射特征



图 12 红旗凹陷均方根振幅属性立体叠合图 Fig.12 Three-dimensional superimposed map of the root-mean-square amplitude attributes of the Hongqi Sag 白色虚线勾勒出丘状火山机构

面边界.根据这些地震反射和属性特征,在过井剖面 区域,进行井震联合综合识别,在钻井周围进行有限 的外推.在无井地震区域,则通过火山机构相模式为 指导,综合考虑火山岩相地震反射特征和地震属性特 征识别.

# 4 火山一沉积旋回和岩相分析钻井检验

综上所述,通过钻井一地震剖面和跨凹陷地震

资料解释,划分出2期火山一沉积旋回和对应的岩 相分布.通常情况下垂直地震构造线的方向建立过 井地震剖面开展岩相和旋回分析,为了检验解释结 果的准确度,针对不同凹陷钻井和地震资料情况解 释过程设置了2种检验方式.第1种为过井建立任 意方向地震剖面,解释过程中不考虑钻井岩心数 据,仅依靠建立的岩相地震特征和旋回划分标准进 行解释,解释结果与岩心岩性和旋回界面进行对比 检验;该方法的优点在于可以围绕钻井岩相、旋回



海拉尔盆地东部其他凹陷受资料限制未进行岩相古地理恢复

划分精确勾勒和检验周围的地震解释成果.第2种 方法适用于凹陷内有多口井钻遇目标地层,利用部 分井进行井震联合岩相解释,建立岩相的地震识别 和旋回划分标志,利用这些标志解释其他地震剖 面,并利用其他钻井数据进行岩相和旋回界面检 验.通过这两种检验方式,盆地内钻遇侏罗系地层 的16口井进行检验结果显示岩相分析和界面标定 准确率达到87%,进一步证实了岩相地震识别标志 和旋回界面标准的可靠性.

## 5 海拉尔盆地火山-沉积地层分布

根据盆内地震与钻井资料开展岩相识别和旋 回划分,恢复了盆内各个凹陷内岩相古地理平面分 布(图13,图14).盆内火山一沉积岩分布受局部构 造、火山喷发作用和古地貌共同影响,表现为复杂 的异质多相体.西部凹陷带以大量多中心点式爆 发、大面积连片分布火山岩为特征,火山机构中心 发育火山角砾岩、流纹岩,机构外围大面积分布凝 灰岩,砂砾岩仅分布于凹陷西部控凹断层处.火山 岩集中在巴彦呼舒凹陷和查干诺尔凹陷的南部,可 以与凹陷外围隆起区的露头观察比对.玛尼图组时 期巴彦呼舒凹陷内沉积岩发育范围明显高于塔木 兰沟组时期,暗示火山断陷湖盆逐渐扩大的过程. 沉积岩集中分布在查干诺尔凹陷北部一带,其中砂 岩、粉砂岩等湖相细粒沉积物在断层下盘展布,填 充于火山机构和断层组成的可容纳空间.呼伦湖凹 陷仅在东南和西南发育少量火山岩,中部发育细粒 砂泥岩沉积.

中部凹陷带多个凹陷内发育孤立的火山机构. 赫尔洪德凹陷火山机构主要分布在断裂带附近,沉 积岩呈条带状沿断裂和火山机构外围分布.赫1井 附近区域揭示浅湖细粒沉积物为主夹少量砾岩,与 钻井的岩性观察一致.红旗凹陷火山岩主要分布在 南部区域,集中在缓坡带和湖盆底部区域;湖相沉 积岩在红旗凹陷北部分布面积较大.新宝力格凹陷



Fig.14 Jurassic lithological geography of Hailaer Basin in the sedimentary era of Manitu Formation 海拉尔盆地东部其他凹陷受资料限制未进行岩相古地理恢复

主要以沉积岩为主,火山主要分布在凹陷边界区 域.乌尔逊凹陷整体沉积岩较发育,在火山机构外 围以粗碎屑砂砾岩为主,塔木兰沟组时期火山一沉 积岩石组合呈条带状与控凹断层近平行分布.与塔 木兰沟组时期相比,玛尼吐组时期中部凹陷带火山 活动强度减弱,湖盆出现萎缩趋势,例如赫尔洪德 凹陷和乌尔逊凹陷的范围明显缩小.

东部凹陷带东明凹陷发育大面积砂砾岩沉积, 火山机构主要分布在南部边界断裂带附近和湖底, 呈散点式分布于凹陷中东部.砂岩、粉砂岩和泥岩 互层沉积,以及粗碎屑砂砾岩呈东西条带状围绕火 山机构相间分布.东部凹陷带玛尼吐组时期湖盆范 围大于塔木兰沟组时期,湖相沉积物范围明显扩大.

综上分析,海拉尔盆地火山机构主要发育于西 部凹陷带以及赫尔洪德凹陷控凹断裂附近,与额尔 古纳断裂带和德尔布干断裂带的展布重合.湖相沉 积物主要分布在盆地中心区域,即查干诺尔凹陷北 部,乌尔逊凹陷中北部、红旗一新宝利格凹陷,总体 呈 NE 向展布.这些凹陷内的火山机构以中心式喷 发为主,在湖盆底或缓坡带形成独立的火山机构, 与控凹断层联合影响古地貌进而控制沉积岩展布.

## 6 结论

海拉尔盆地内将侏罗系地层一般命名为"塔木 兰沟组",本文通过盆缘区地质调查、火山岩岩性和 锆石U-Pb年龄统计,与盆内井震综合解释,获得新 认识主要有:

(1)海拉尔盆地内侏罗系可以划分出2个火山-沉积旋回.第1个旋回对应于盆缘区的塔木兰沟组,发育中基性、酸性火山岩和沉积岩夹层,锆石U-Pb年龄在165~155 Ma之间;第2个旋回对应于玛尼吐组,以酸性火山岩和沉积岩为主,锆石U-Pb年龄在154~145 Ma之间.

(2)建立了海拉尔盆地侏罗系火山岩相地震识别、旋回界面识别标志.火山岩之间沉积岩夹层可

以用来约束和识别旋回界面.根据每个凹陷井震资料建立特征的火山岩相识别标志,以准确刻画火山机构.在地震反射基础上,充分运用均方根振幅对 岩性敏感的特征来勾勒火山机构和外围沉积岩.综 合钻井资料、地震反射和均方根属性开展岩相古地 理解释.

(3)火山一沉积岩相古地理恢复表明海拉尔盆 地保罗系火山机构主要集中在西部凹陷带,中部和 东部凹陷带发育少量火山机构,沉积岩填充于火山 机构外围区域,受火山机构和控凹断裂围限的可容 纳空间控制.

#### References

- Avseth, P., Mukerji, T., Jørstad, A., et al., 2001. Seismic Reservoir Mapping from 3-D AVO in a North Sea Turbidite System. *Geophysics*, 66(4): 1157-1176. https://doi. org/10.1190/1.1487063
- Chen, C., Lü, X.B., Li, J., et al., 2020. Petrogenesis and Tectonic Setting of Intermediate - Felsic Volcanics in Ta'erqi Area, Central Great Xing'an Range. *Earth Science*, 45(12): 4446-4462(in Chinese with English abstract).
- Chen, F.J., Wang, X.W, 1997. Genetic Types, Tectonic Systems and Geodynamic Models of Mesozoic and Cenozoic Oil and Gas Bearing Basins in China. *Geoscience*, 11 (4): 411-424(in Chinese with English abstract).
- Chen, G.X, 2018. The Application of Seismic Attributes in Volcanic Reservoir Prediction of the Yingcheng Formation in the SS2-1 Block(Dissertation). Northeast Petroleum University, Daqing(in Chinese with English abstract).
- Chen, J.L., Wu, H.Y., Zhu, D.F., et al., 2007. Tectonic Evolution of the Hailar Basin and Its Potentials of Oil-Gas Exploration. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 147-159 (in Chinese).
- Chen, Z. G., Zhang, L. C., Zhou, X. H., et al., 2006. Geochronology and Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks Section in Manzhouli Xinyouqi, Inner-Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2971-2986(in Chinese with English abstract).
- Christorpher, P., 2002. Ross Comparison of Popular AVO Attributes, AVO Inversion, and Calibrated AVO Predictions. *The Leading Edge*, 21(3): 244-252. https://doi. org/10.1190/1.1463776
- Cooke D., Ball V., Muryanto T., et al., 1999. What is the Best Seismic Attribute for Quantitative Seismic Reservoir Characterization. Annual Meeting Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 1588-1591.
- Dong, J. L., Song, S. G., Su, L., et al., 2019. Onset of the

North-South Gravity Lineament, NE China: Constraints of Late Jurassic Bimodal Volcanic Rocks. *Lithos*, 334–335 (12): 58–68. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.016

- Fan, Y.W., 2017. The Study of Jurassic Strata and Sedimentary Characteristics of the Hailar Basin: As an Example of Central Depression(Dissertation). Northeast Petroleum University, Daqing(in Chinese with English abstract).
- Feng, Y.H., Bian, W.H., Gu, G.Z., et al., 2016. A Drilling Data-Constrained Seismic Mapping for Intermediate-Mafic Volcanic Facies. *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 228–236 (in Chinese with English abstract).
- Graham, S. A., Hendrix, M. S., Johnson, C. L., et al., 2001. Sedimentary Record and Tectonic Implications of Mesozoic Rifting in Southeast Mongolia. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1560–1579. https://doi.org/ 10.1130/0016-7606(2001)113<1560:sratio>2.0.co;2
- Hao, B., 2014. Comparison of Volcanic Cycle Division Programs and Its Significance for Reservoir Prediction. Special Oil & Gas Reservoirs, 21(2): 70-74, 154(in Chinese with English abstract).
- Hardage, B. A., Carr, D. L., Lancaster, D. E., et al., 1996. 3-D Seismic Imaging and Seismic Attribute Analysis of Genetic Sequences Deposited in Low - Accommodation Conditions. *Geophysics*, 61(5): 1351-1362. https://doi. org/10.1190/1.1444058
- Huang, D. Y., 2019. Jurassic Integrative Stratigraphy and Timescale of China. Science China (Earth Sciences), 62: 223-255
- Huang, Y.L., Wang, P.J., Men, G.T., et al., 2007. 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. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1183-1191(in Chinese with English abstract).
- Ji, G.S., Dai, J.S., Ma, X.B., et al., 2002. Stratigraphic Classification and Correlation of Volcanic Rock in First and Second Segments of Funing Group in Jinhu Sag. *Journal* of the University of Petroleum, China, 26(4): 5-9(in Chinese with English abstract).
- Ji, W.T., 2019. Tectonic Evolution Process of Troughs and Its Control on the Hydrocarbon Accumulation in Hailar Basin (Dissertation). Northeast Petroleum University, Daqing (in Chinese with English abstract).
- Jia, J.H., Tao, S.Z., Fang, X., et al., 2021. Deep Jurassic Volcano - Sedimentary Succession, Reservoir - Seal Assemblage and Their Exploration Significance in Northeast China: a Case Study of Jurassic in the Hailar Basin. Acta Geologica Sinica, 95(2): 377-395 (in Chinese with

3071

English abstract).

- Li, D.Q., Yang, C., Liu, N.Z., et al., 2020. Identification of Favorable Volcanic Reservoirs Based on AVO Characteristics: Case Study of the Songkar'ersu Formation in Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(12): 1779– 1791(in Chinese).
- Li, P.P., Ge, W.C., Zhang, Y.L, 2010. Division of Volcanic Strata in the Northwestern Part of Hailar Basin: Evidence from Zircon U-Pb Dating. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2482-2494(in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Zhou, X.G., Wang, D.D., et al., 2015. Geochemical Characteristics of Crude Oil and Oil-Source Correlation of Well Tucan 1, Tuquan Basin, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1946-1951(in Chinese with English abstract).
- Liang, Z.Z., Li, N., 2019. Mixed Facies of Volcanic Mechanism Recognition in Songnan Fault Depression by Seismic Multi-Attribute Fusion. *Natural Gas and Oil*, 37(3): 56– 60, 105(in Chinese with English abstract).
- Lu, Z. J., Na, R., Cui, J. F., et al., 2011. Volcanic Rock Reservoir of the Cretaceous in Honghao'ershute Sag in Erlian Basin, Inner Mongolia. *Journal of Palaeogeography*, 13(2): 201-208(in Chinese with English abstract).
- Luo, Q.S., Nie, C.Q., Wen, C.J., et al., 2009. Division and Correlation of Volcanic Eruptible Gyration and Period of Kalagang Formation in Niudong Area, Xinjiang. *Geosci*ence, 23(3): 515-522(in Chinese with English abstract).
- Ma, S.W., Luo, J.L., Xu, X.L., et al., 2018. Division of the Carboniferous Volcanic Eruption Cycles and Geological Significance in Xiquan Area, Junggar Basin. *Progress in Geophysics*, 33(5): 1936-1942(in Chinese with English abstract).
- Su, F., Zhang, H.H., Zhang, J., et al., 2017. Geochemistry of the Hydrocarbon Source Rock of Middle Jurassic Wanbao Formation from Well TD1 in Tuquan Basin, Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 26(4): 377-382, 396 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L., Zhang, J., Su, F., 2019. Reservoir Characteristics of Dark Mudstones from Middle Jurassic Wanbao Formation from TD1 Well in Tuquan Basin, Inner Mongolia. *Geological Review*, 65(S1): 173-174(in Chinese).
- Wan, C.B., Xue, Y.F., Sun, Y.W., et al., 2020. Discovery of Late Jurassic Sporopollen Assemblage from the Tamulangou Formation in the Hongqi Sag of the Hailar Basin, Inner Mongolia, China. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94(05):1718-1720.
- Wang, S.X., Zhang, Z.H., Zhang, Z.P., et al., 2012. Geochemical Characteristics and Oil-Source Correlation of the

Jurassic Source Rocks in the Erlian Basin. *Bulletin of Mineralogy*, *Petrology and Geochemistry*, 31(4): 396-403 (in Chinese with English abstract).

- Xia, M.L., Wen, L., Li, Y., et al., 2020. Permian Volcanic Eruption Cycle, Environment and Model in the Jianyang Area of the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 40(9): 11-22(in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Pei, F.P., Wang, F., et al., 2013. Spatial-Temporal Relationships of Mesozoic Volcanic Rocks in NE China: Constraints on Tectonic Overprinting and Transformations between Multiple Tectonic Regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74:167-193
- Yang, A.X., Sun, D.Y., Gou, J., et al., 2016. Characteristics and Time of Enhedaling Volcanic Edifice from Shanghulin Basin in Northern Great Xing'an Range. *Global Geology*, 35(3): 687-696(in Chinese with English abstract).
- Yang, X.P., Jiang, B., Yang, Y.J., 2019. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Great Xing'an Range Area. *Earth Science*, 44(10): 3237-3251(in Chinese with English abstract).
- Yi, J., Wang, P.J., Li, R.L., et al., 2014. Seismic Volcanostratigraphy of the Songliao Basin, Early Cretaceous: Typical Volcanic Seismic Facies and Geological Interpretation Pattern. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 715-729(in Chinese with English abstract).
- Yu, J., 2010. Seismic Prediction of Volcanic Reservoir in the Xujiaweizi Fault-Depression of Songliao Basin(Disseration). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Quan, J.Y., Zhang, Y.J., et al., 2020. Late Mesozoic Tectonic Evolution of the Southern Great Xing'an Range, NE China: Evidence from Whole - Rock Geochemistry, and Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes from Volcanic Rocks. *Lithos*, 362-363:105409.
- Zhang, J., Xin, C.K., Zhang, J.Y., 2018. A Study on Volcanic Eruption Edifices and Stages and Their Control over Hydrocarbon Accumulation: a Case Study of the First Member of the Yingcheng Formation in Yingshan Sag, Northern Songliao Basin. Oil & Gas Geology, 39(2): 291-299(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.B., Yan, H.Q., Hu, L.L., et al., 2018. Eruption Cycles and Petrochemical Features of Early Carboniferous Volcanic Rocks in Ejina Banner, Inner Mongolia. Northwestern Geology, 51(3): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X., Yu, S.Q., Zhang, D.Z., et al., 2019. Characteristics and Major Controlling Factors of Gas-Water Distribution

in Tight Volcanic Gas Reservoir in Xushen Gas Field, Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(5): 1038–1047(in Chinese with English abstract).

- Zhu, H.T., Liu, Y.M., Wang, Y.L., et al., 2014. Volcanic Eruption Phases and 3-D Characterization of Volcanic Rocks in BZ34-9 Block of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 39(9): 1309-1316(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Zhao, W.Z., Jia, C.Z., et al., 2008. Formation and Distribution of Volcanic Hydrocarbon Reservoirs in Sedimentary Basins of China. *Petroleum Exploration and Development*, 35(3): 257-271(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈超, 吕新彪, 李杰, 等, 2020. 大兴安岭中段塔尔气地区中酸 性火山岩成因及构造背景. 地球科学, 45(12): 4446-4462.
- 陈发景,汪新文,1997.中国中、新生代含油气盆地成因类型、 构造体系及地球动力学模式.现代地质,11(4):411-424.
- 陈广馨,2018. 地震属性在SS2-1区块营城组火山岩储层预测 中应用(博士毕业论文). 大庆:东北石油大学.
- 陈均亮, 吴河勇, 朱德丰, 等, 2007. 海拉尔盆地构造演化及油 气勘探前景. 地质科学, 42(1): 147-159.
- 陈志广,张连昌,周新华,等,2006. 满洲里新右旗火山岩剖面 年代学和地球化学特征. 岩石学报,22(12):2971-2986.
- 范彦文,2017.海拉尔盆地侏罗系地层及沉积特征:以中部断 陷带为例(博士毕业论文).大庆:东北石油大学.
- 冯玉辉,边伟华,顾国忠,等,2016.中基性火山岩井约束地震 岩相刻画方法.石油勘探与开发,43(2):228-236.
- 郝彬,2014.火山旋回划分方案对比及在储层预测中的意义. 特种油气藏,21(2):70-74,154.
- 黄玉龙,王璞珺,门广田,等,2007.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.吉林大学学 报(地球科学版),37(6):1183-1191.
- 纪文婷,2019.海拉尔盆地洼槽构造演化及对油气成藏的控制 (博士毕业论文).大庆:东北石油大学.
- 冀国盛,戴俊生,马欣本,等,2002.金湖凹陷闵北地区阜一、 二段火山岩地层划分与对比.石油大学学报(自然科学版), 26(4):5-9.
- 贾进华,陶士振,方向,等,2021.东北地区深层侏罗系火山-沉积序列与储盖组合及勘探意义:以海拉尔盆地侏罗系 为例.地质学报,95(2):377-395.
- 李道清,杨川,刘念周,等,2020.基于AVO属性的火山岩有 利储层刻画:以准噶尔盆地松喀尔苏组为例.天然气地球 科学,31(12):1779-1791.
- 李萍萍, 葛文春, 张彦龙, 2010. 海拉尔盆地西北部火山岩地 层划分的锆石U-Pb年代学证据. 岩石学报, 26(8): 2482-

2494.

- 李世臻,周新桂,王丹丹,等,2015.内蒙古突泉盆地突参1井 原油地球化学特征与油源分析.地质通报,34(10):1946-1951.
- 梁正中,李宁,2019. 地震多属性体融合识别混合岩相火山机 构.天然气与石油,37(3):56-60,105.
- 路占军, 娜仁, 崔俊峰, 等, 2011. 内蒙古二连盆地洪浩尔舒特 凹陷白垩系火山岩储集层. 古地理学报, 13(2): 201-208.
- 罗权生,聂朝强,文川江,等,2009.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.现代地质,23 (3):515-522.
- 马尚伟, 罗静兰, 许学龙, 等, 2018. 准噶尔盆地西泉地区石炭 系火山喷发旋回划分及地质意义. 地球物理学进展, 33 (5): 1936-1942.
- 苏飞,张海华,张健,等,2017.内蒙古突泉盆地突D1井中朱 罗统万宝组烃源岩地球化学特征.地质与资源,26(4):377-382,396.
- 孙雷,张健,苏飞,2019.内蒙古突泉盆地突D1井中侏罗统万 宝组暗色泥岩储层特征.地质论评,65(S1):173-174.
- 汪生秀,张枝焕,张志平,等,2012.二连盆地侏罗系烃源岩地 球化学特征及油源贡献.矿物岩石地球化学通报,31(4): 396-403.
- 夏茂龙,文龙,李亚,等,2020.四川盆地简阳地区二叠系火山 喷发旋回、环境与模式.天然气工业,40(9):11-22.
- 杨爱雪,孙德有,苟军,等,2016.大兴安岭北部上护林盆地恩 和大岭火山机构特征与时代.世界地质,35(3):687-696.
- 杨晓平, 江斌, 杨雅军, 2019. 大兴安岭早白垩世火山岩的时 空分布特征. 地球科学, 44(10): 3237-3251.
- 衣健,王璞珺,李瑞磊,等,2014. 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.吉林大 学学报(地球科学版),44(3):715-729.
- 于晶,2010. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩储层地震预测 研究.北京:中国地质大学(北京).
- 张姣,辛朝坤,张军勇,2018.火山喷发机构、期次及其控藏作用:以松辽盆地北部莺山凹陷营一段为例.石油与天然气地质,39(2):291-299.
- 张亚波, 闫海卿, 胡雷雷, 等, 2018. 内蒙古额济纳旗地区早石 炭纪火山岩喷发旋回与岩石化学特征.西北地质, 51(3): 1-15.
- 周翔,于世泉,张大智,等,2019.松辽盆地徐深气田致密火山 岩气藏气水分布特征及主控因素.石油与天然气地质, 40(5):1038-1047.
- 朱红涛,刘依梦,王永利,等,2014. 渤海湾盆地黄河口凹陷BZ34 -9区带火山岩三维刻画及火山喷发期次.地球科学,39(9): 1309-1316.
- 邹才能,赵文智,贾承造,等,2008.中国沉积盆地火山岩油气 藏形成与分布.石油勘探与开发,35(3):257-271.