

胡佳,王丽丽,王立贤,等.基于岩浆汇聚区和上升通道特征的火山岩分布规律:以松辽盆地长岭断陷下白垩统营城组为例.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):429-446. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220167.
Hu Jia, Wang Lili, Wang Lixian, et al. Volcanic Rock Distribution Based on Characteristics of Pathway and Magma Chamber: An Example from Lower Cretaceous Yingcheng Formation in Changling Fault Depression of Songliao Basin. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024,54(2):429-446. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220167.

基于岩浆汇聚区和上升通道特征的火山岩分布规律 ——以松辽盆地长岭断陷下白垩统营城组为例

胡佳¹,王丽丽¹,王立贤¹,韩昊天¹,陶鹏²,唐华风²

1. 中国石油吉林油田分公司地球物理勘探研究院,吉林 松原 138000
2. 吉林大学地球科学学院,长春 130061

摘要:关于断陷尺度火山岩充填规律的全面认识,需要从深部岩浆汇聚区开始,到输导体系,再到其喷发分散,进行统一分析;但在研究过程中往往还是以单项分析为主,导致火山岩分布规律的认识不够全面。为了深入分析断陷盆地火山岩分布的规律,利用钻井、地震资料和已有的深部结构研究成果,开展松辽盆地长岭断陷下白垩统营城组火山岩岩浆汇聚区和上升通道对火山岩分布特征的控制作用分析。取得如下认识:营城组火山岩在平面上呈现东西分带和南北分块的特征,在中央洼陷带集中分布;水平断距是火山岩是否发育的敏感参数,垂直断距对火山岩厚度影响更显著;断裂仅是火山岩发育的必要条件,非充分条件;火山岩分布还受软流圈上拱和地壳伸展减薄区域的约束;断陷盆地火山岩充填往往与沉降中心对应,当火山岩体积较小时烃源岩可以与火山岩组成好的生储组合,而当火山岩体积过大时会显著减少细粒沉积岩的沉积空间,不利于烃源岩在空间上延伸。

关键词:火山岩;分布规律;控制因素;营城组;白垩系;松辽盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220167

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Volcanic Rock Distribution Based on Characteristics of Pathway and Magma Chamber: An Example from Lower Cretaceous Yingcheng Formation in Changling Fault Depression of Songliao Basin

Hu Jia¹, Wang Lili¹, Wang Lixian¹, Han Haotian¹, Tao Peng², Tang Huafeng²

1. Geophysical Exploration Institute, Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan 138000, Jilin, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

收稿日期:2022-06-02

作者简介:胡佳(1983—),男,高级工程师,主要从事深层火山岩气藏地震勘探方面的研究,E-mail: hujia-ji@petrochina.com.cn

通信作者:唐华风(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事火山地层和火山岩储层综合方面的研究,E-mail: tanghfhc@jlu.edu.cn

基金项目:吉林省重点研发计划项目(20230203107SF);国家重点研发计划项目(2019YFC0605402)

Supported by the Key Research and Development Program of Jilin Province (20230203107SF) and the National Key Research and Development Programs of China (2019YFC0605402)

Abstract: The distribution pattern of volcanic rocks in a scale of fault depression requires a unified analysis, starting from the deep magma chamber, to the transport system, and then to the eruption and distribution. However, the dominating of individual factor analyses in research process generally leads to an insufficient understanding. To fully understand the spatial distribution of the Lower Cretaceous Yingcheng Formation volcanic rocks in Changling faulted depression, the controlling effects of the magma chamber and ascending pathways are analyzed based on drilling data, seismic data and deep structures. The results are as follows: Laterally, the volcanic rocks of the Yingcheng Formation exhibit characteristics of east-west zonation and north-south blockiness, concentrating in the central depression zone. Horizontal fault throw is a sensitive parameter for determining the development of volcanic rocks, while vertical fault throw has a more significant impact on volcanic rock thickness. Faults are only a necessary condition for the development of volcanic rocks, not a sufficient one. The distribution of volcanic rocks is also constrained by up-doming of the asthenosphere and thinning zones in the crust due to extension. Volcanic material filling corresponds to the basin subsidence center in general. When the volume of volcanic rocks is limited, hydrocarbon source rocks can form a good source-reservoir combination with volcanic rocks. However, when the volume of volcanic rocks is large, it significantly reduces the deposition space for fine-grained sedimentary rocks and limits the spatial extension of hydrocarbon source rocks.

Key words: volcanic rocks; spatial distribution; controlling factors; Yingcheng Formation; Cretaceous; Songliao basin

0 引言

火山岩是断陷盆地充填的重要组成部分,已成为油气勘探的重要目标,近年来取得了丰富的勘探成果^[1]。火山岩分布规律作为油气藏研究的重要基础也备受关注;在勘探的早期阶段利用重-磁-电方法识别火山岩时,盆地尺度的火山岩分布规律对于识别的准确性有着重要的约束作用^[2-4],可在平面上将火山岩分布范围进行圈定;在勘探的中后期利用三维地震识别火山岩时,火山岩体的相带分布规律对于岩相识别的准确性有着重要的约束作用^[5-7],可进一步从纵向上细分火山喷发序列,建立精细的火山地层格架。断裂作为岩浆上升通道的重要组成部分,在火山岩分布规律研究时受到重点关注^[8-12],并已取得如下认识:通常火山喷发中心沿盆内深大断裂呈串珠状分布^[13-14],不同喷出口的喷发物可叠置连片且广泛分布,也可以形成孤立的火山岩体;火山岩厚度和与断裂的距离成非线性反比关系^[15-17]。上述宏观分布规律,对于断陷盆地火山岩识别起到了重要的指导作用。

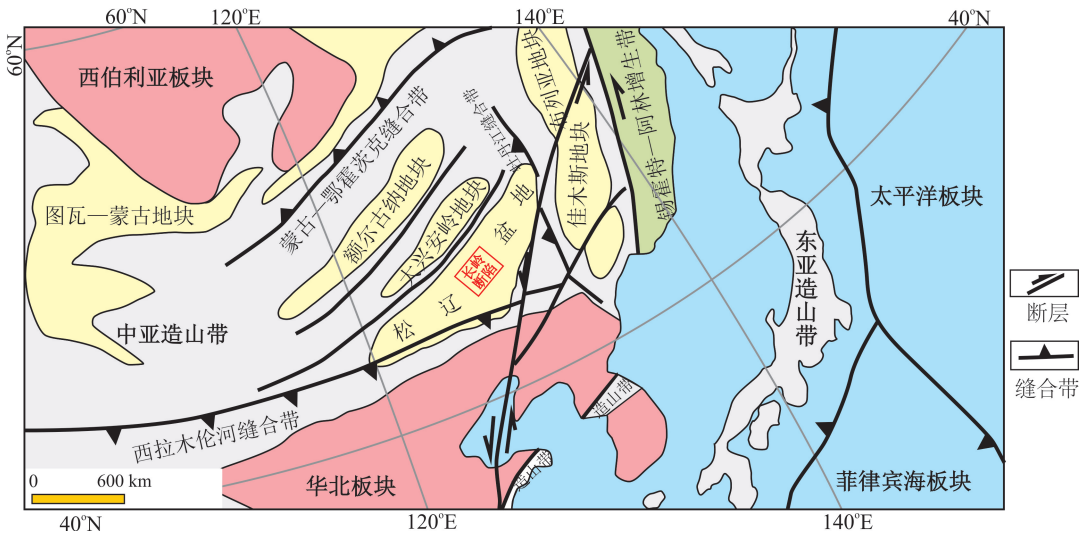
和对油气藏的研究需要将烃源岩区、输导体系和聚集区作为一个整体系统考虑,才能全面地认识油气藏的分布规律一样,对火山岩分布规律的认识应该从深部岩浆汇聚区开始,到输导体系(岩浆从深

部汇聚区到地表喷出口的所有通道的总称),再到其喷发分散进行精细研究,才能得到全面合理的认识。对于汇聚区,松辽盆地火山岩存在两大类源区,分别为幔源成因的中基性火山岩和壳源成因的酸性火山岩;根据深部汇聚区深部速度和电阻异常进行的分析,识别出了地幔和地壳中的低阻体^[18],但相关资料还较少。对于输导体系的研究,主要集中在地震勘探资料所揭示的输导体系的上部,多在讨论火山岩与断裂距离的关系,但对于断裂的样式对火山岩分布的影响分析还未引起足够的重视。总体上,火山岩分布规律研究还存在深部资料不足的问题,缺少从深部汇聚区—上升通道—火山喷发分散的整体分析,使得对火山岩分布规律的认识还不全面,如难以解释同一条深大断裂为何存在火山岩发育和不发育两种区域。

为了进一步明确火山岩分布规律,本文以松辽盆地长岭断陷为例,利用钻井、地震资料和已有深部结构的研究成果,综合深部岩浆汇聚区和上升通道特征两方面整体讨论火山岩分布规律,以期为盆地充填演化研究和火山岩油气勘探提供依据。

1 地质概况

松辽盆地处于蒙古—鄂霍茨克缝合带、西拉木伦河缝合带和牡丹江缝合带之间(图1),具有“下断



据文献[19-20]修编。

图1 松辽盆地区域位置图

Fig.1 Regional location map of Songliao basin

中坳上隆顶平”四元结构,是裂陷、拗陷、反转共同作用的结果^[18]。松辽盆地是一个典型的活动大陆边缘盆地,具有典型的“下断上坳”结构,其构造演化可分为:1)同裂谷阶段,以火山作用和断陷作用为主,主要由火石岭组、沙河子组和营城组3个地层序列构成;2)后裂谷阶段,是松辽盆地成盆作用的主要阶段,由登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组和嫩江组构成;3)构造反转阶段,是盆地构造-热事件作用以及盆地被改造的主要时期,由四方台组和明水组构成,一直持续到15 Ma^[21-22]。火山岩主要发育在同裂谷阶段。

松辽盆地同裂谷阶段到后裂谷阶段的初期可划分为2个伸展期,每期可细分为早期快速伸展和晚期缓慢伸展2个亚期。第一伸展期对应火石岭组和沙河子组沉积期,快速伸展亚期形成了火石岭组火山岩,缓慢伸展亚期形成了沙河子组沉积岩;第一伸展期以热穹窿式多向拉伸为标志,可能是侏罗纪加厚岩石圈的根部发生拆沉作用导致地壳弹性回调和岩浆底侵的结果。第二伸展期对应营城组和登娄库组沉积期,快速伸展亚期形成了营城组火山岩,缓慢伸展亚期形成登娄库组沉积岩;第二伸展期则以SEE—NWW向区域伸展为标志,是对中国东部广泛的地壳伸展拆离和岩石圈减薄事件的响应,可能是伊泽纳崎板块俯冲产生的弧后扩张效应^[23]。

火山岩体分布受断裂控制,常沿NNE、NNW、近SN深大断裂串珠状分布。深大断裂具有低角度

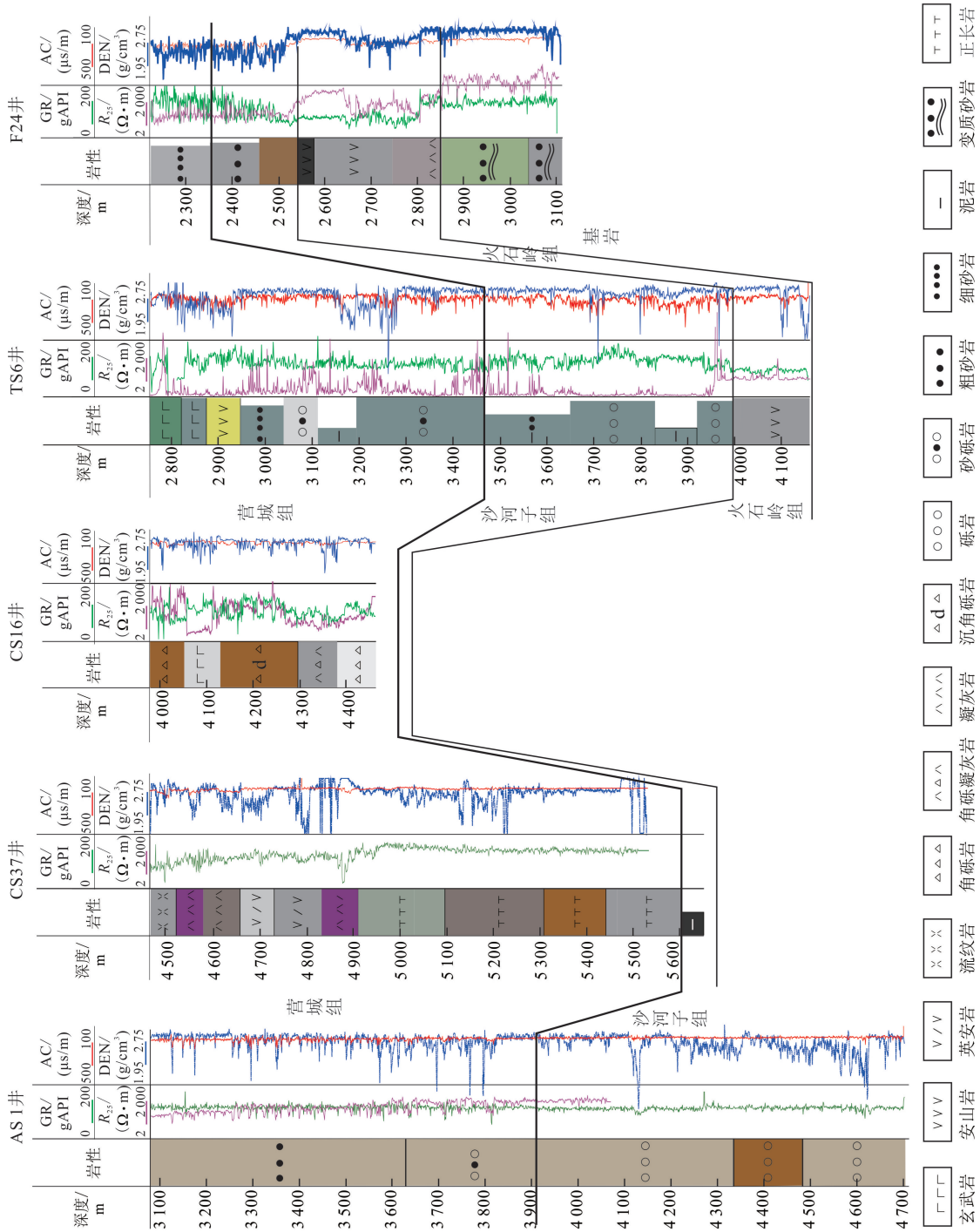
犁式正断层的特征,也控制了不对称复合式地堇的发育^[24]。断裂是在中—晚侏罗世NNE向基底断裂左行走滑派生的次级断裂基础上,经断陷期强烈的地壳伸展拆离作用形成。

2 长岭断陷火山岩特征

2.1 地层序列

长岭断陷自下而上发育火石岭组、沙河子组和营城组3个组(图2),下面进行简要介绍。区域上火石岭组可划分出两段:区域上一段以砂砾岩为主,夹少量的泥岩和煤层,在本区钻井揭示较少;二段以火山岩为主,包括安山岩、安山质角砾熔岩、玄武岩、玄武质角砾岩、沉火山角砾岩等。长岭断陷有少数钻井揭示了该套序列,如TS6和F24井揭示的火石岭组二段安山岩和凝灰岩(图2)。

区域上沙河子组也可划分出两段,一段为暗色泥岩夹煤,二段为砂岩和砾岩。在松辽盆地北部的徐家围子断陷可细分为4个三级层序^[25],在上部层序中也可发育火山岩^[26-27]。在松辽盆地南部梨树断陷七棵树油田可细分为2个四级旋回^[28]。本文分析的地层精度未达到四分的精度,所以仅与段对应。如CS37井揭示了沙河子组一段暗色泥岩;TS6井揭示了沙一段和沙二段,由2个粗到细的序列构成,由砂砾岩变为泥岩或泥质粉砂岩。AS1井揭示了沙二段砾岩,厚度超过700 m(图2)。区域上在底部可发育底砾岩或凝灰质砂岩,局部地区可见侵入岩。



GR. 自然伽马; AC. 声波时差; DEN. 密度; $R_{2.5}$. 2.5 m 底部梯度电阻率。

图 2 长岭断陷 ASI - CS37 - CS16 - TS6 - F24 井地层对比

Fig.2 Strata correlation of ASI - CS37 - CS16 - TS6 - F24 in Changling fault depression

区域上营城组从岩性上可划分出3段:一段以酸性火山岩为主,包括流纹岩、流纹质火山碎屑岩和碎屑熔岩等,分布较为广泛;二段为火山-沉积序列,是火山喷发间歇期的堆积物,以砾岩和沉火山碎屑岩为主,可夹煤,其厚度不稳定、变化较大,在长岭断陷该段分布局限;三段以中基性火山岩为主,包括玄武岩、安山岩和粗面岩等。从岩性组合特征看,中央洼陷带钻井揭示了营城组一段酸性火山岩;缓坡带TS6井揭示了营城组三段火山岩和营城组二段沉积岩;AS1和F24井揭示了营城组二段沉积岩(图2)。

2.2 营城组火山岩类型

研究区火山岩类型多样,岩心和岩屑资料揭示熔岩、碎屑熔岩、碎屑岩和沉火山碎屑岩均发育。

熔岩以中酸性熔岩为主,发育少量基性熔岩;还可细分出钙碱性系列和碱性系列,以钙碱性系列为主。根据成分和组构特征划分方案,常见碱长流纹岩(图3a)、粗面英安岩(图3b、c)、安山岩(图3d)、玄武岩(图3e)、气孔杏仁玄武岩(图3f)、珍珠岩等(图3g)。

碎屑熔岩是熔岩和火山碎屑岩的过渡类型,可根据火山碎屑粒径和成分等进行细分。常见流纹质晶屑凝灰熔岩(图3h)和流纹质角砾熔岩等。火山碎屑岩较为发育,可根据碎屑粒径和成分等进行细分,常见流纹质角砾岩、流纹质凝灰熔岩(图3i)、英安质凝灰岩、安山质角砾岩、安山质凝灰岩和玄武质角砾岩等,具有块状和在地表易自破碎的特征(图3j),在凝灰岩中常见鸡骨状玻屑(图3k)。沉火山碎屑岩也可根据碎屑粒径进行细分,常见沉火山角砾、沉凝灰岩等。还存在一些特殊岩性,如隐爆角砾岩(图3l)。

不同区块岩性构成差异较大,如长深1区块CS1井营城组以流纹岩、玄武岩、流纹质角砾岩、流纹质凝灰熔岩等为主,双坨子区块以安山岩和流纹质凝灰岩为主(图4)。

2.3 火山岩分布

利用钻井和三维地震资料在长岭断陷营城组识别出火山岩体60个(图5),总面积可达3 324 km²。识别出的火山岩体均具有地层厚度大,地震相特征为丘形、穹窿,顶界面强反射、内部杂乱等典型火山岩地震反射的特征;其中多个岩体经钻井证实发育厚层状的火山岩。部分厚度小,地震相特征为席状、连续性好、强反射的火山岩未包括在这60个岩体中。但从火山岩的体积来看,识别出的岩体可基本代表断陷盆地火山岩充填的主体,可以满足讨论

火山岩在断陷尺度分布规律的要求。

从识别出的火山岩体来看,其在平面上分布具有不均匀性,呈现出东西分带和南北分块的特征。东西分带表现为中央洼陷带较为集中分布,西部陡坡带只有极少量火山岩分布,东部缓坡带靠近中央洼陷带处较为发育、远离中央洼陷带处不发育(图5);南北分块表现为在中央洼陷带的南部和中部发育、北部不发育的特征。统计长岭断陷现有钻井揭示岩性特征可知,长岭断陷东侧以中性和酸性火山岩为主,西侧以酸性火山岩为主。

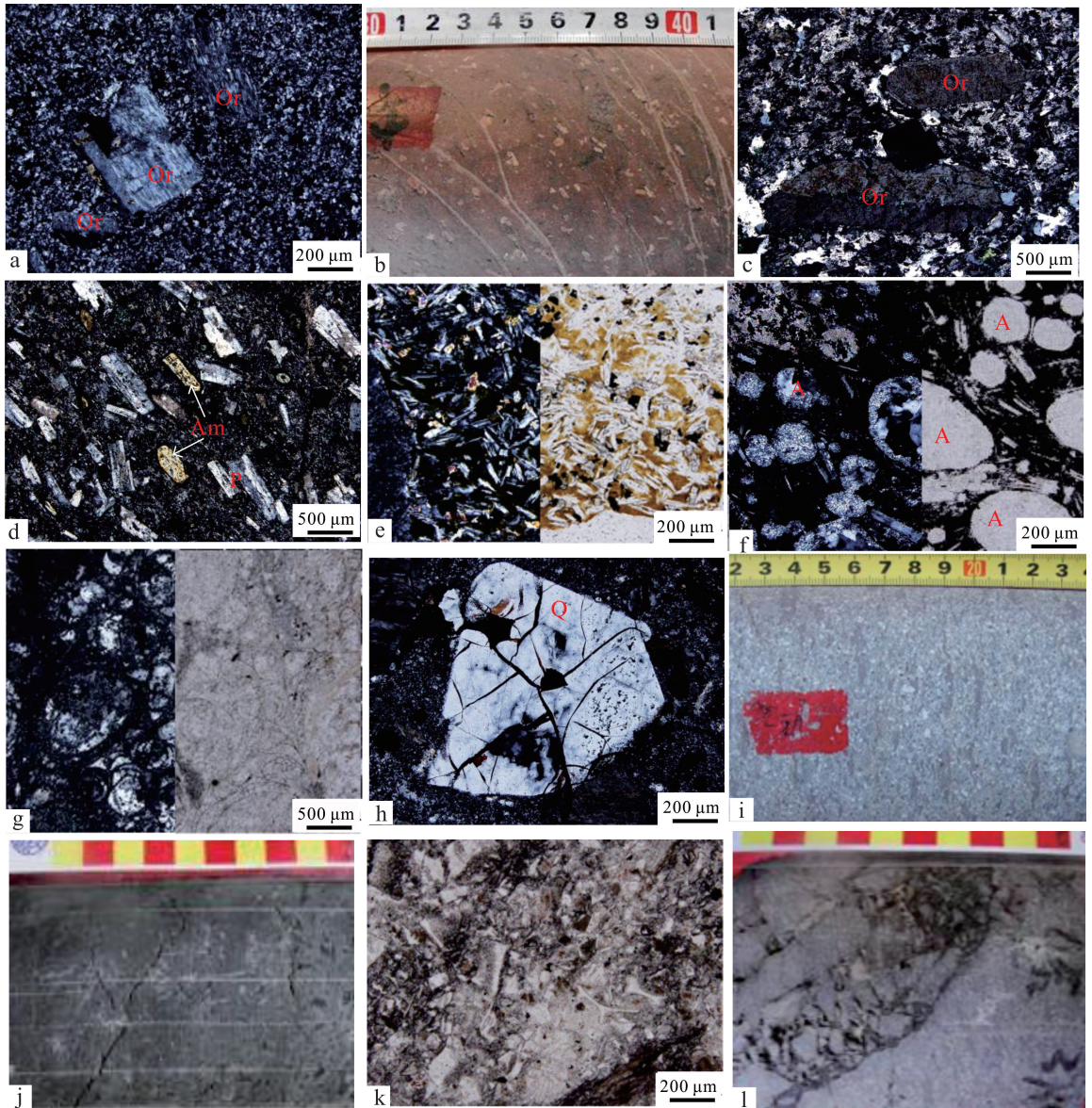
3 火山岩的岩浆汇聚区特征

对于长岭断陷火山岩的岩浆起源需要对中基性和酸性两类火山岩进行分析。首先是中基性岩类的岩浆来源,主要有两种观点:一是认为源自亏损地幔的部分熔融,受地壳混染,但程度存在不同认识^[29-30];二是源自经历了深部地幔流体交代富集作用的软流圈地幔,岩浆未遭受地壳物质的混染^[31]。中基性岩具有轻稀土元素总量高、Pb正异常和Nb、Ta轻微负异常的特征,暗示岩浆演化过程中存在地壳混染,这与大兴安岭中生代基性岩浆源既有富集特征又有亏损特征的双重性地球化学特征相似^[32]。其次是酸性火山岩的成因,如营城组流纹岩的岩浆成因是地壳部分熔融形成,地壳熔融部分可能是新生的^[33];也可能是亏损地幔的初生地壳部分熔融,并受到地壳混染而成^[34-35];还可能是大部分古老地壳和少量新生地壳的部分熔融混合而成^[36-37]。由此可见,由复杂源区形成的岩浆供应了营城期岩浆喷发,形成了火山地层。

对于深部岩浆房特征,主要依据速度异常、电阻率异常等资料来识别。松辽盆地开展过地学大断面、大地电磁等研究,但没有针对长岭断陷的研究,所以用松辽盆地北部的深部结构来讨论其深部岩浆的特征。对松辽盆地深部二维电性结构的研究,其深部存在两个高导层:一是在地幔部分,对应中基性岩浆的汇聚区,其深度与已知的火石岭组火山岩的起源深度超过40 km一致^[38];二是在壳幔界面之上的下地壳中^[38],对应酸性岩的汇聚区,其深度与已知营城组岩浆起源深度20~30 km一致^[38]。从地幔高导异常来看,其最高点在中央凹陷区,但其最高点与沉积地层最厚点是不对应的,这表明在断陷期地壳伸展可能是不对称的。从地壳高导异常来看,地壳内的高导层可分为两个隆起区,分别对应中央凹陷和东南隆

起,中央凹陷之下的隆起埋深较小(图6)。这也表明松辽盆地之下的岩浆分布的不对称性和不均匀性。地幔和地壳两部分高导异常的隆起区域,更容易形成

高角度张性断裂,岩浆更容易上升,促进该区域火山岩的发育。因此,深部高导异常的隆起区是指示盆地火山岩分布的另一个重要约束条件(图6)。



a. 碱长流纹岩,CS18井,4 311.00 m;b,c. 粗面英安斑岩,CS3井,2 669.70 m,粗面结构,基质中碱性长石微晶(Or)定向排列呈粗面结构;d. 角闪安山岩,CS6井,4 011.67 m,斜长石和角闪石斑晶定向排列呈线斑结构,基质具玻晶交织结构;e. 玄武岩,TS6井,2 820.00 m,斜长石搭成格架,中间充填数粒辉石等暗色矿物呈间粒结构,充填基性火山玻璃呈间隐结构(相同倍数,左侧为正交偏光,右侧为单偏光);f. 气孔杏仁玄武岩,CS105井,4 000.00 m(相同倍数,左侧为正交偏光,右侧为单偏光);g. 珍珠岩,CS6井,4 195.00 m,珍珠裂纹由于脱玻化重结晶作用变得不清晰(相同倍数,左侧为正交偏光,右侧为单偏光);h. 流纹质晶屑凝灰熔岩,CS1-2井,3 674.70 m,石英具晶内炸裂纹;i. 流纹质晶屑浆屑凝灰熔岩,CS1-2井,3 674.70 m,浆屑定向排列呈假流动构造;j. 流纹质玻屑凝灰岩,CS105井,3 929.77 m;k. 流纹质凝灰岩,CS105井,3 929.77 m,鸡骨状玻屑;l. 流纹质隐爆角砾岩,CS103井,3 727.92 m,流纹质隐爆角砾结构,角砾为流纹岩。Or.正长石;Am.角闪石;P.斜长石;A.气孔杏仁;Q.石英。

图3 长岭断陷下白垩统营城组火山岩特征

Fig.3 Characteristics of volcanic rocks of Lower Cretaceous Yingcheng Formation in Changling fault depression

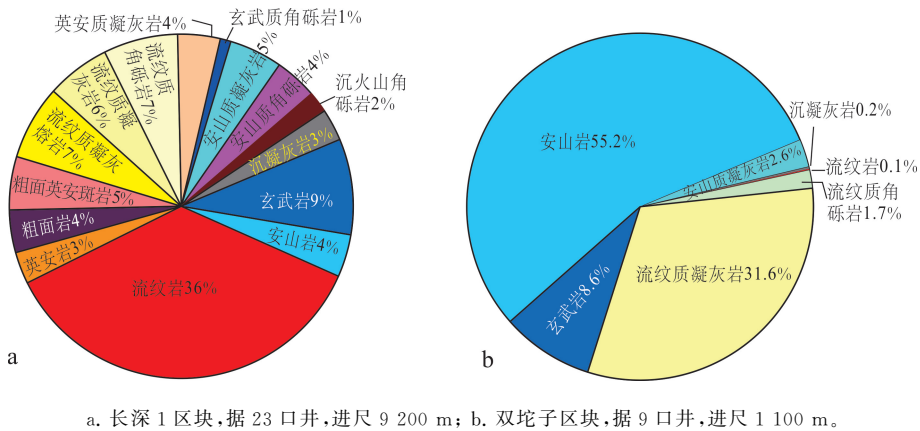


图 4 长岭断陷典型区块下白垩统营城组火山岩类型特征

Fig.4 Compound of volcanic rock of Lower Cretaceous Yingcheng Formation in typical blocks of Changling fault depression

4 火山岩岩浆上升通道特征

断裂是岩浆上升的重点通道,特别是高角度的断裂^[36],其控制着火山岩分布。为了了解火山岩分与断裂的关系,从断裂的几何特征和演化角度入手进行分析。

4.1 深大断裂特征

松辽盆地长岭断陷发育的断层可分为 3 种:一级断裂,控制断陷边界的断裂,穿入基底连接到深部拆离面,为铲式特征。特征最为明显的是 F₁,其在北部 AS1 井附近表现为上陡下缓的特征,在中南部表现为阶梯状向下延伸(图 7);在平面上延伸较为广泛,如 F₁可以从南到北贯通(图 8),断裂具有较大的水平断距和垂直断距。二级断裂,控制了盆地内部的次一级凹陷边界,断面角度较高,常终止于一级断裂断面处,在平面上延伸范围中等(图 7、8)。三级断裂,是一些派生断裂,仅切入基底的顶部,在平面上延伸范围较小(图 7)。

利用平衡剖面技术制作构造发育史剖面,统计断裂的水平断距和垂直断距,再利用断层两侧地层厚度计算断层生长指数,可知:营城期控陷断裂 F₁的水平断距为 16.16 km,垂直断距仅为 0.18 km,也体现了基底以强烈水平方向拉伸减薄特征;其他二级断裂的水平断距在 0.17 ~ 2.98 km 之间,均显著小于 F₁,垂直断距在 0.34 ~ 2.47 km 之间,都大于 F₁,二级断裂的生长指数为 1.25 ~ 3.39(图 9a)。沙河子期控陷断裂 F₁的水平断距为 5.41 km,垂直断距仅为 0.23 km,也体现了基底以水平方向拉伸减薄为主;其他二级断裂的水平断距在 0.40 ~ 2.83 km 之间,均显著小于 F₁,垂直断距在 0.36 ~ 2.25 km

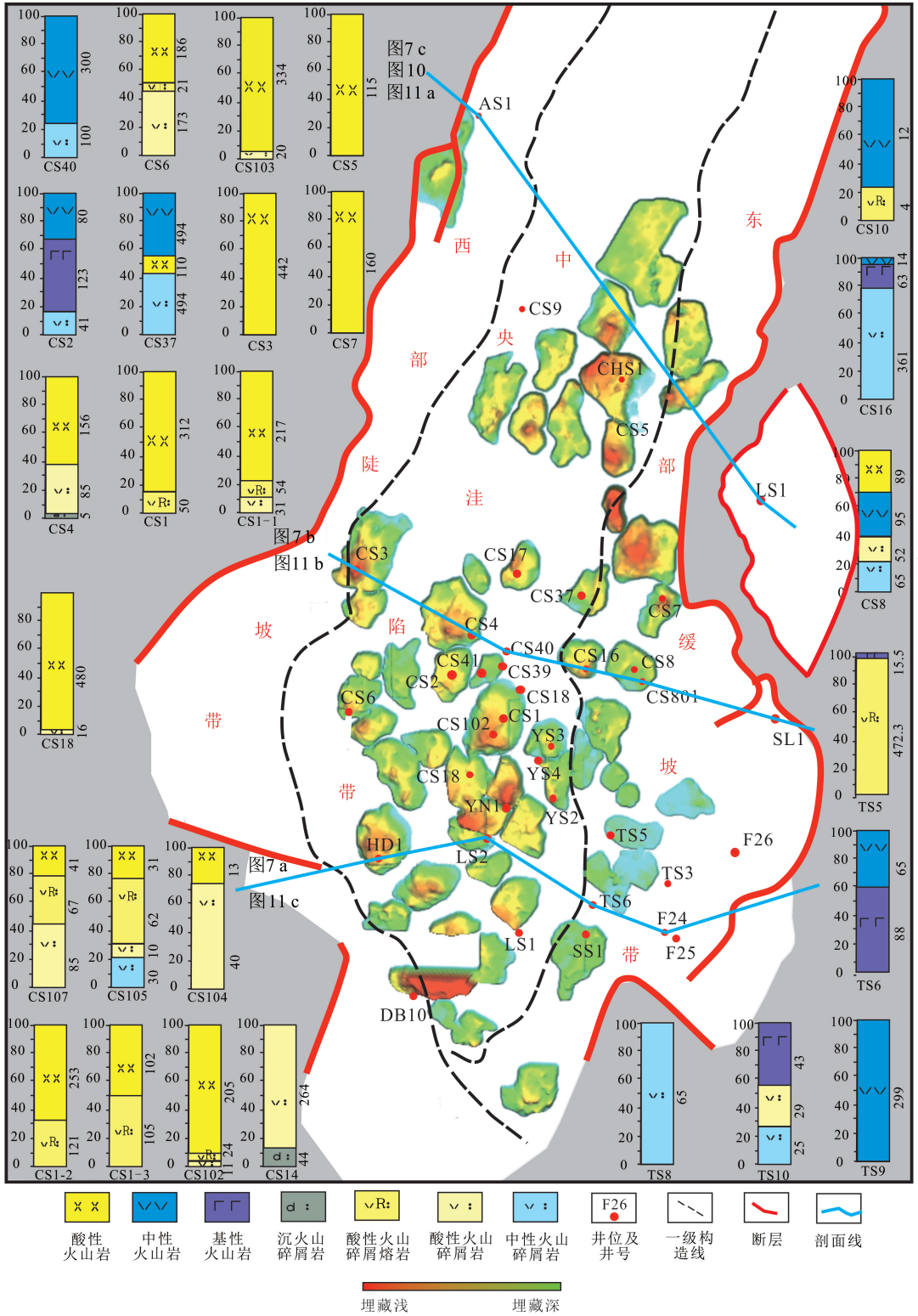
之间,都大于 F₁,二级断裂的生长指数为 1.28 ~ 3.24(图 9b)。在火石岭期控陷断裂 F₁的水平断距为 8.43 km,垂直断距仅为 0.53 km,体现了基底强烈的水平方向拉伸减薄;其他二级断裂的水平断距在 0.28 ~ 2.47 km 之间,均显著小于 F₁,垂直断距在 0.34 ~ 2.10 km 之间,多数都大于 F₁,二级断裂的生长指数为 1.14 ~ 2.11(图 9c)。

相比较而言,火石岭组时期,一级断裂水平断距较大,二级断裂水平断距较小,生长指数小;沙河子组时期控陷断裂的水平断距最小,二级断裂的水平断距变大,生长指数也变大;营城组时期,一级断裂水平断距最大,二级断裂水平断距较小,生长指数中等。从总的水平断距来看,南部最大、中部次之、北部最小(图 9)。

4.2 断裂与火山岩分布

本文主要分析了断距与火山岩厚度的关系,统计的断裂均为断陷期发育的断裂,断距是断陷期的累计效应。从统计的结果来看,断距与火山岩厚度存在两组关系:一是火山岩厚度与断裂的断距具有正相关,表明断裂控制着火山岩的充填;二是断距增加,火山岩厚度为 0,表明该处断裂不控制火山岩厚度(图 10)。因此,认为断裂是控制火山岩分布的必要条件,而非充分条件。

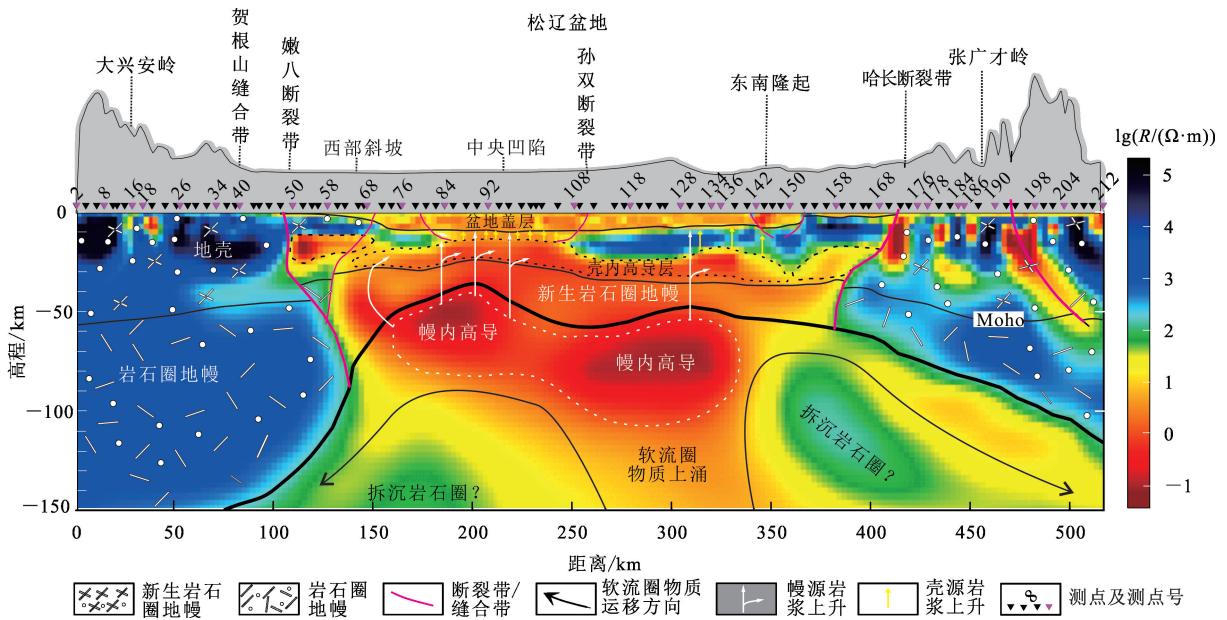
从水平断距-火山岩厚度和垂直断距-火山岩厚度的关系来看,水平断距在 0.33 km 时就发育火山岩(图 10a),垂直断距在 0.73 km 时才发育火山岩(图 10b)。因此,认为水平断距是识别火山岩是否发育的更为敏感参数。另外,从火山厚度和断距的拟合关系来看,火山岩厚度的增加受垂直断距的影响更加显著。



图中的柱状图是钻井岩性构成特征,柱状图左侧数值为岩性体积分数(%),右侧数值为岩性的累计厚度(m)。图中的火山岩体均为营城组。

图 5 松辽盆地长岭断陷营城组火山岩体分布特征和岩性特征

Fig.5 Distribution and lithology characteristics of volcanic body of Yingcheng Formation in Changling fault depression, Songliao basin



大地电磁测深资料源于文献[17],在此基础上进行了岩浆房、岩浆上升通道等地质解释。

图 6 松辽盆地深部电性结构特征和地质解释

Fig.6 Deep electrical structure characteristics and geological interpretation of Songliao basin

5 讨论

5.1 火山岩分布模式

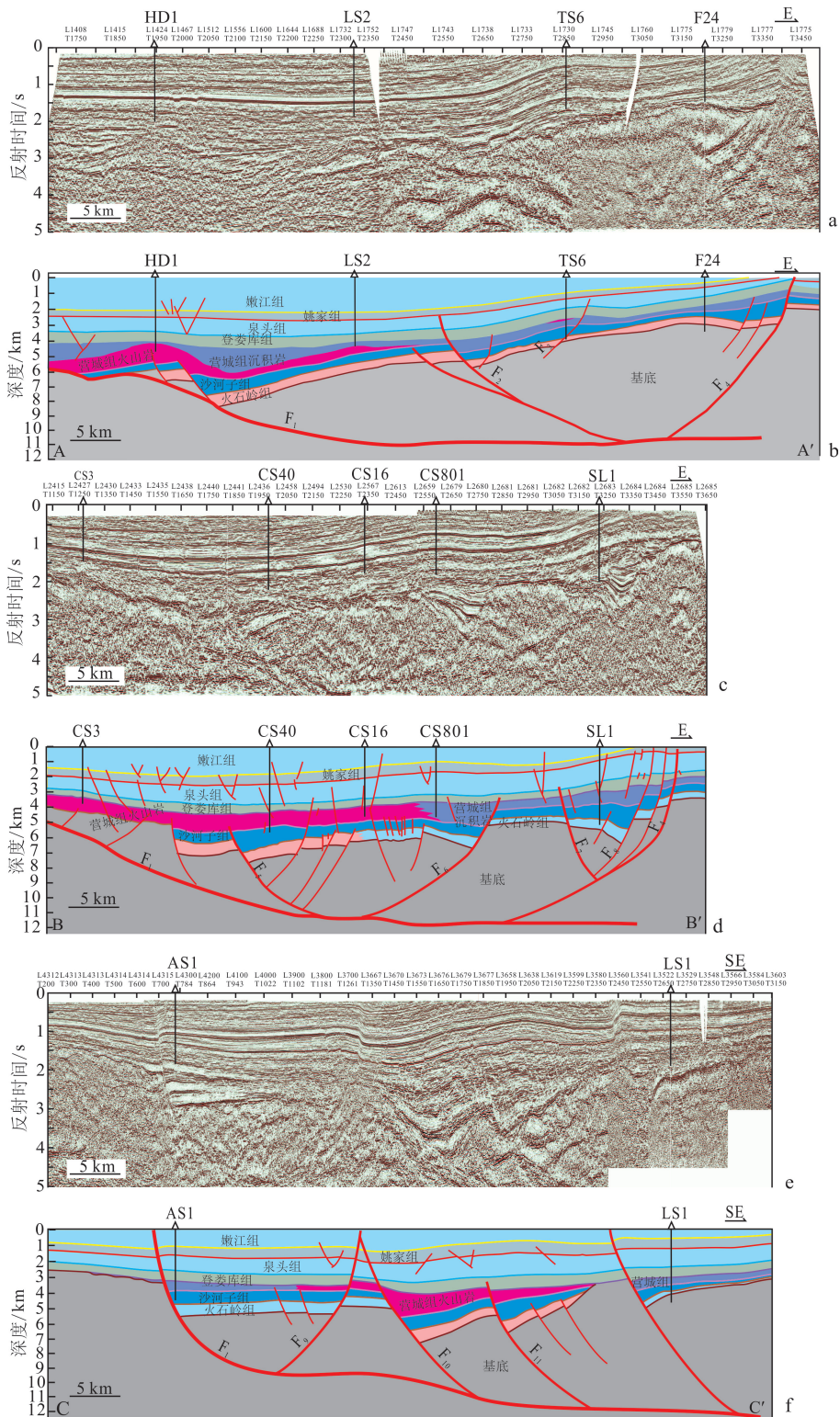
火山岩分布与岩浆在深部的汇聚、深大断裂与岩浆房沟通部位相关。松辽盆地断陷期岩浆上涌机制认为与早期加厚陆壳的拆沉和/或类似弧后的伸展环境有关^[38],主要受太平洋板块俯冲控制^[34,39]。岩浆上升最容易的区域均是在软流圈隆起的区域。

据松辽盆地北部深部高导异常体分布可知,高导体通常可指示岩浆的存在。由于晚白垩世至今仅存在构造反转和盆地沉降中心向西迁移一定距离,无明显的其他改造。现今的壳幔结构与营城期的壳幔结构存在一定的继承性。据此推测地下两层高导体揭示了营城期岩浆房具有两层结构,壳内低阻体提供了酸性岩浆,幔内低阻体提供了中基性岩浆(图 6)。但更为详细的岩浆演化信息还难以从目前的大地电磁测深资料获取。断裂系统可能需要分成两部分,中上地壳主要为拆离断层和下地壳-上地幔的高角度断裂。下地壳-上地幔的断裂由于资料精度的限制不能明确地刻画,但据该部分岩石的特征主要是韧性变形带,角度较低的断裂多处于封闭状态、不利于成为岩浆通道,高角度的断裂易处于开启状态、有利于成为岩浆通道。所以,估计岩浆在下地壳-上地幔之间以垂直上升为主,在中上地壳部分可能会

有水平方向的分量。水平断距大的断裂和软流圈上拱区域对应火山岩发育区(图 11)。相比较之下,纯剪模式下基底块体发生旋转,导致地壳厚度分布不均匀,地壳厚度相对小的区域是深部岩浆房上升的有利区,更容易发育火山岩(图 11)。

5.2 火山堆积与盆地充填的关系

从长岭断陷的剖面来看,营城期火山岩厚度中心往往对应盆地的沉降中心(图 12)。如果没有火山岩的存在,远离盆地边缘的沉降中心位置可成为盆地的沉积中心,其应该是细粒沉积物的沉积场所。当有火山岩发育时,则会使细粒沉积物的充填空间受到侵占,对于油气成藏来看,可能会出现两种情况:当火山岩体积较小且不能大面积分布时,火山岩仍能与同层位细粒沉积物形成侧向对接模式,这有利于形成火山岩油气藏,该类油气藏在辽河盆地常见^[38],在火山岩勘探时也作为一种指导模式进行实践^[39]。类似的火山充填在新西兰 Taranaki 盆地 Kora 火山可见^[40],Kora 火山是在浅海一半深海的环境中发育的孤立火山,火山岩侧相与细粒沉积对接可形成上述生储组合相式。当火山岩体积过大时,其侵占了细粒沉积的堆积空间,这时与火山岩同层位的沉积岩以粗粒为主,难以形成烃源岩,自然就不能形成火山岩与烃源岩侧向对接模式。如 HD1 井就是快速建造,形成局部高地,营城组沉积岩逐渐



a. 长岭断陷南部过 HD1 - LS2 - TS6 - F24 井地震剖面; b. 长岭断陷南部过 HD1 - LS2 - TS6 - F24 井剖面; c. 长岭断陷中部过 CS3 - CS40 - CS16 - CS801 - SL1 井地震剖面; d. 长岭断陷中部过 CS3 - CS40 - CS16 - CS801 - SL1 井剖面; e. 长岭断陷北部过 AS1 - LS1 井地震剖面; f. 长岭断陷北部过 AS1 - LS1 井剖面。

图 7 长岭断陷断裂特征和火山岩分布连井剖面图

Fig.7 Faults characteristics and volcanic rocks distribution of Changling fault depression

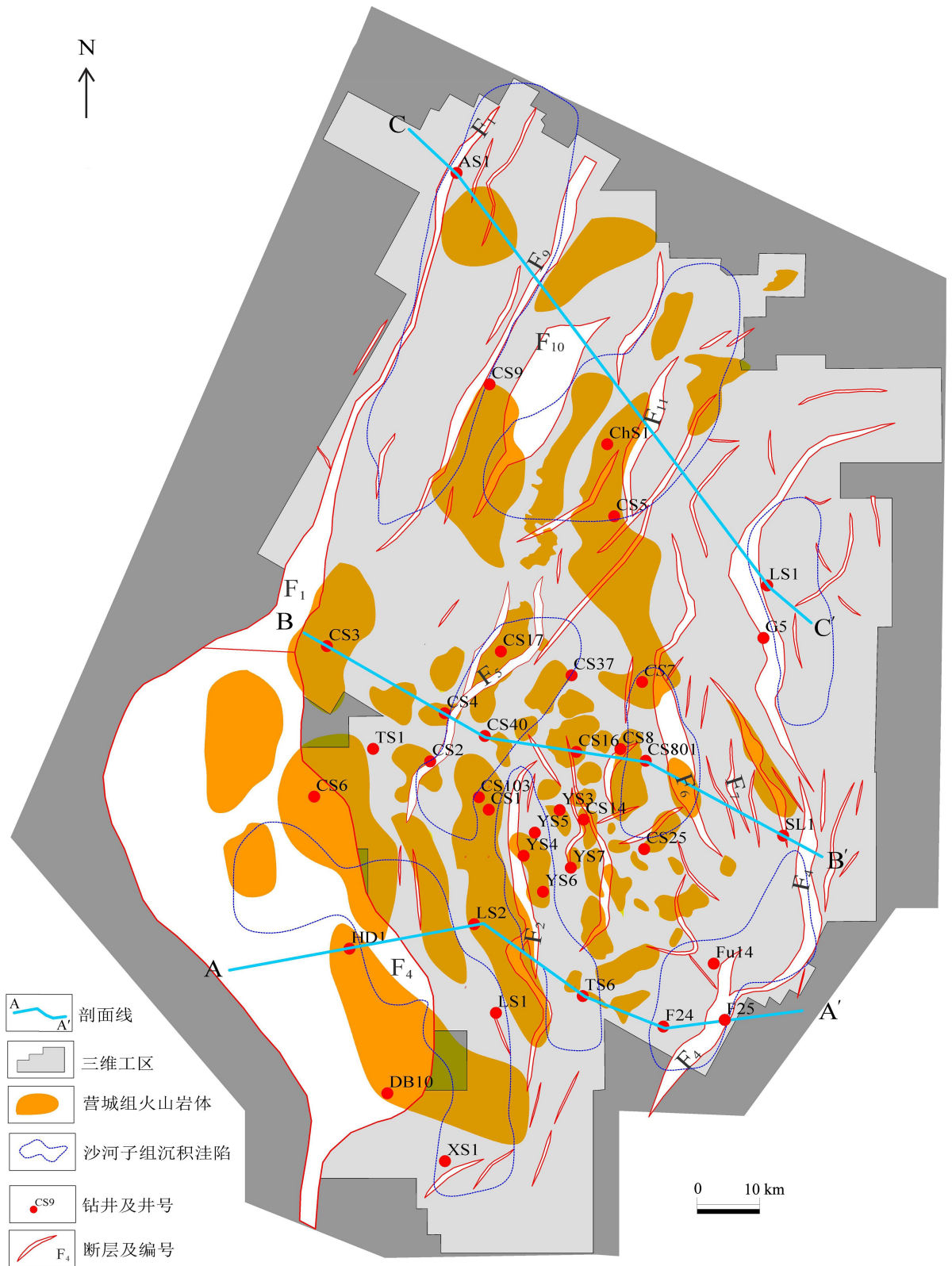
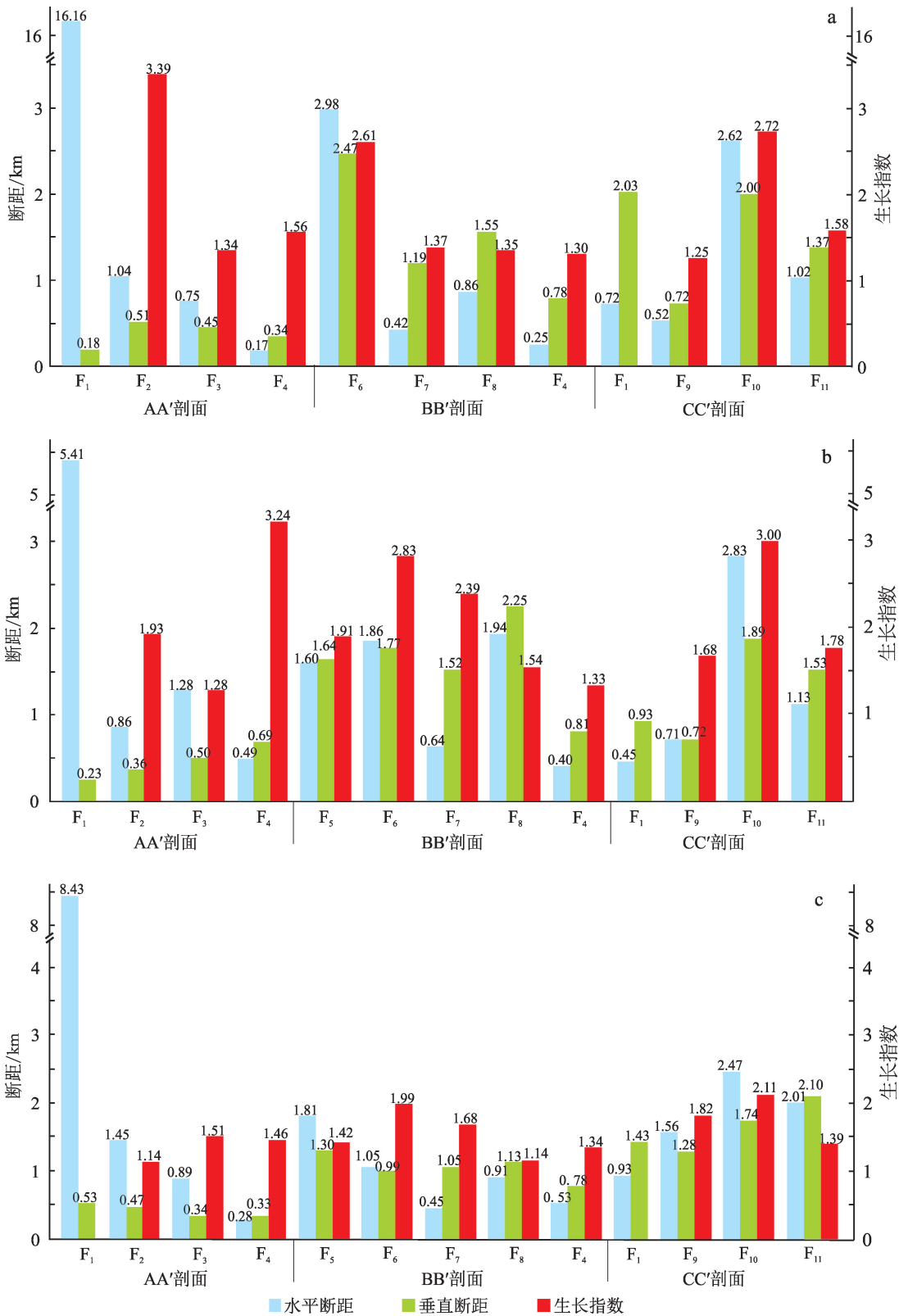


图 8 长岭断陷深大断裂、营城组火山岩体和沙河子组沉积洼槽叠合图

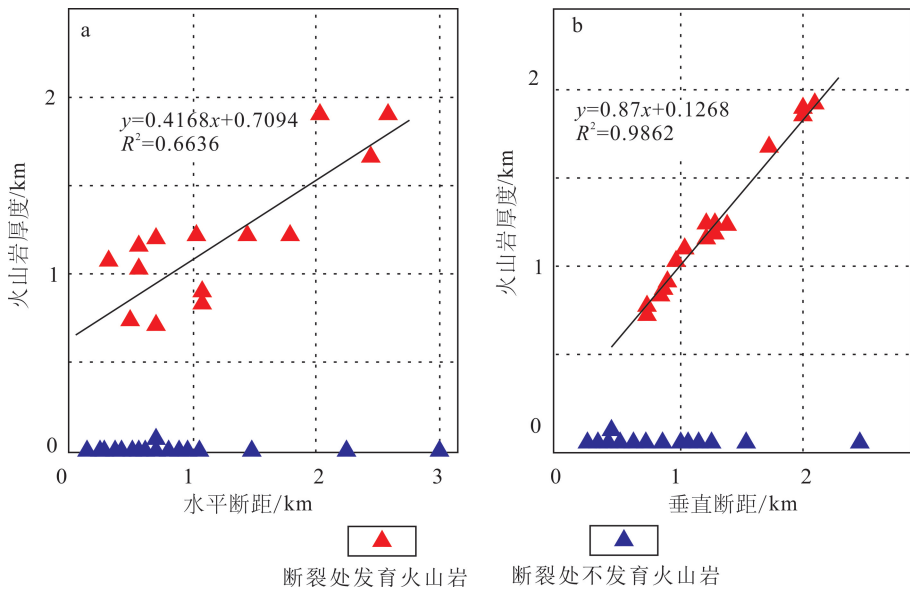
Fig.8 Deep major faults, Yingcheng Formation volcanic rocks and deposit center of Shahezhi Formation of Changling fault depression



a. 营城组; b. 沙河子组; c. 火石岭组。

图 9 长岭断陷深大断裂断陷期活动性特征

Fig.9 Characteristics of activity of deep major fault during Early Cretaceous of Changling faulted depression



a. 水平断距与火山岩厚度关系;b. 垂直断距与火山岩厚度关系。R 为相关系数。

图 10 研究区火山岩厚度与断裂断距的对应关系

Fig.10 Relationship between volcanic rock thickness and fault throw

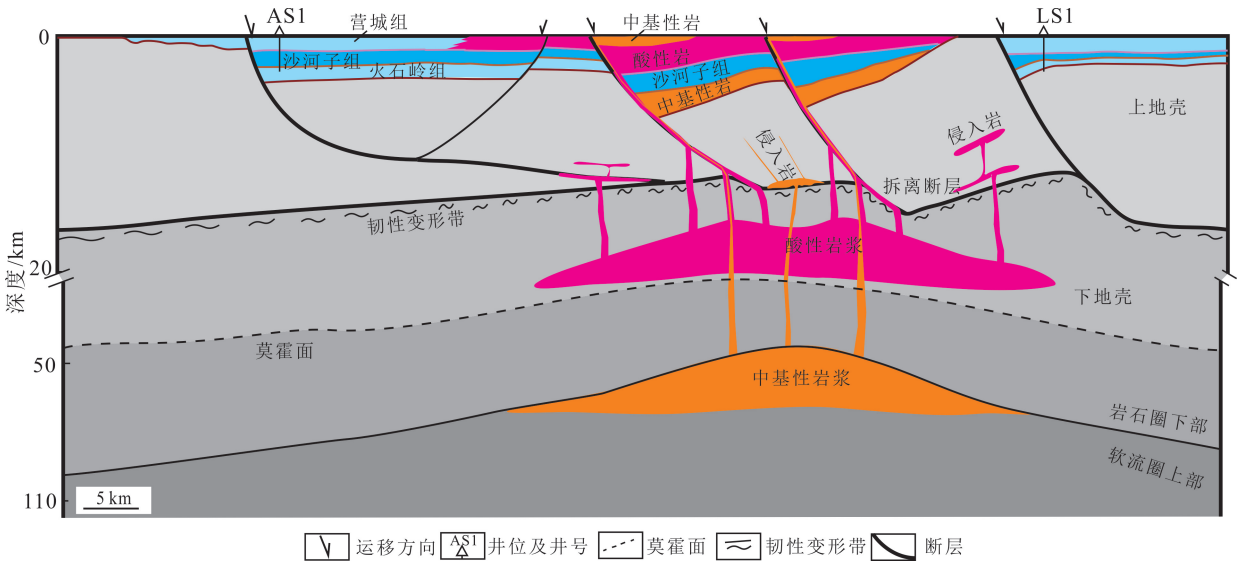
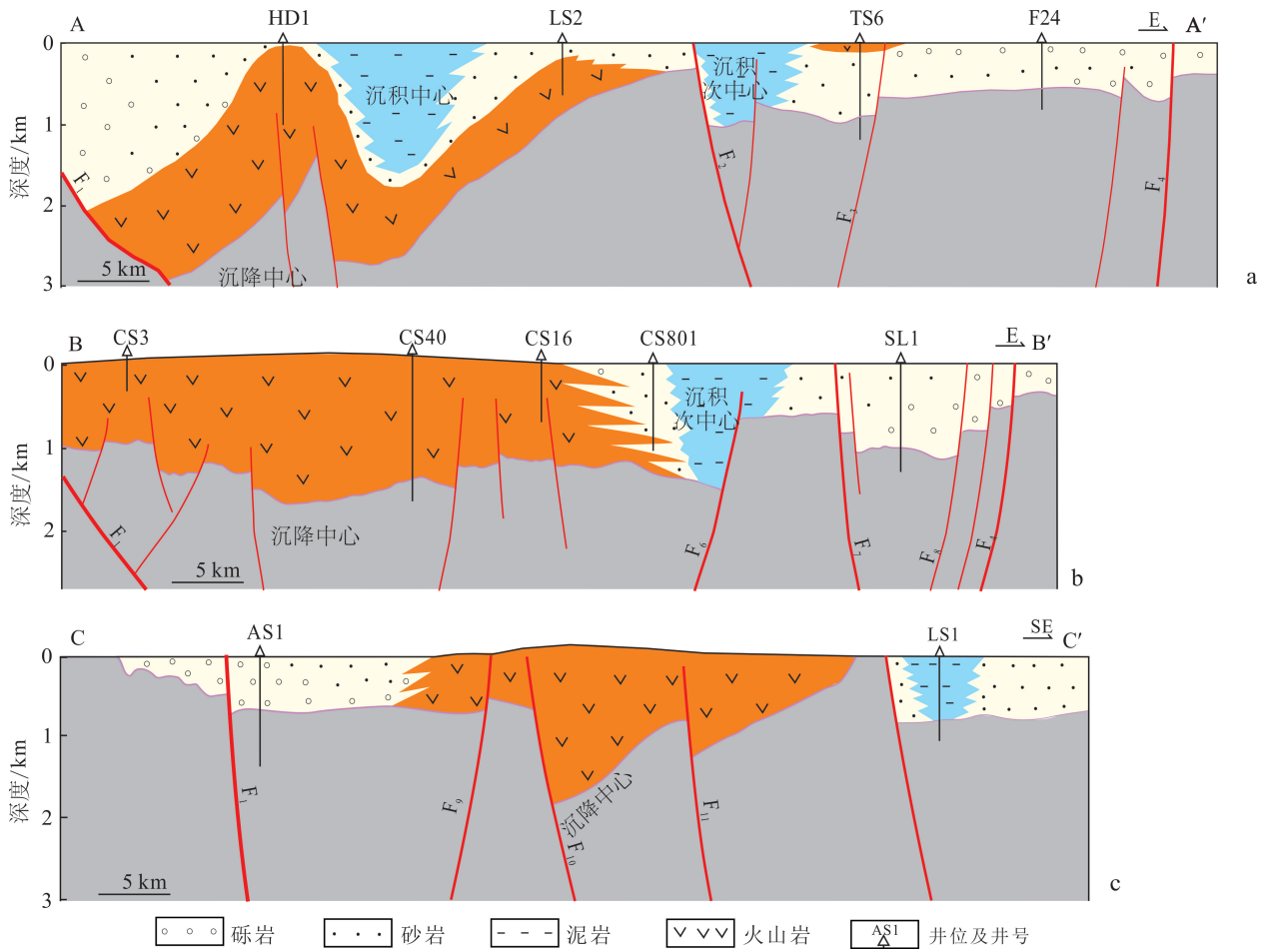


图 11 长岭断陷下白垩统营城组火山岩、岩浆房和断裂关系示意图

Fig.11 Schematic diagram of the relationship between volcanic rocks, magma houses and fractures in the Lower Cretaceous Yingcheng Formation in Changling fault depression

披覆在火山岩上,到营城组末期才将该火山岩覆盖;火山岩体积过大,占据了盆地的可容纳空间,火山岩作为物源区提供了粗粒沉积,进一步侵占了细粒颗粒的沉积空间,致使营城组烃源岩不发育。这种情况在长岭断陷较为普遍^[41],使得营城组火山岩的气源多来源于下伏地层沙河子组和火石岭组二段^[42-43]。钻井揭示,松辽盆地王府断陷的地层中火

石岭组火山岩厚度占比可达到 58%^[44],致使火石岭组缺少烃源岩,火石岭组火山岩的气源需要来自于上覆地层的沙河子组^[45-47]。所以火山地层充填盆地对于油气来讲是把双刃剑^[48-50],一方面火山岩可以与细粒岩组成好的生储组合,另一方面会减少细粒沉积岩占盆地充填的比例^[51],不利于烃源岩在空间上的延伸,取决于火山岩体积的大小及面积分布。



a. 长岭断陷南部过 HD1 - LS2 - TS6 - F24 井剖面; b. 长岭断陷中部过 CS3 - CS40 - CS16 - CS801 - SL1 井剖面; c. 长岭断陷北部过 AS1 - LS1 井剖面。

图 12 长岭断陷下白垩统营城组火山-沉积充填模式

Fig.12 Volcanic-sedimentary filling model of Lower Cretaceous Yingcheng Formation in Changling fault depression

6 结论

1) 岩心和岩屑资料揭示长岭断陷发育熔岩、碎屑熔岩、碎屑岩和沉火山碎屑岩等火山岩。在平面上分布具有不均匀性,呈现出东西分带和南北分块的特征。东侧以中性和酸性火山岩为主,西侧以酸性火山岩为主。

2) 断裂是火山岩发育的必要条件,而非充分条件。火山岩厚度与断距呈正相关,水平断距对于火山岩是否发育更为敏感,火山岩厚度受垂直断距影响更显著。整体上长岭断陷中南部水平断距大,火山岩分布就更广泛;北部水平断距小,火山岩分布就局限。

3) 软流圈上拱区域反映了岩浆源区的分布范围,是控制火山岩分布的另一个关键因素。相比较

而言,纯剪模式下基底块体发生旋转,导致地壳厚度分布不均匀,地壳厚度相对小的区域是深部岩浆房上升的有利区,更容易发育火山岩。

4) 断陷盆地火山岩充填往往占据盆地的沉降中心区域,当火山岩体积较小时,可与细粒岩组成好的生储组合;当火山岩体积较大时,减少细粒沉积物的可容纳空间且不利于烃源岩在空间上的延伸,从而使盆地的含油气性变差。

参考文献 (References):

[1] 唐华风,王璞珺,边伟华,等. 火山岩储层地质研究回顾 [J].石油学报,2020,41(12):1744 - 1773.
Tang Huafeng, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Review of Volcanic Reservoir Geology [J]. Acta Petrolei Sinica,2020,41(12):1744 - 1773.

[2] 李成立,崔瑞华,刘益中. 盆地基底岩性的综合地球

- 物理预测方法:以松辽盆地滨北地区基底岩性预测为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2):491-498.
- Li Chengli, Cui Ruihua, Liu Yizhong. Comprehensive Geophysical Prediction Method of Hasement Lithology: Example of Binbei Area, Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 491-498.
- [3] 周耀明, 朱文斌, 陈正乐, 等. 准噶尔盆地克一百断裂带火山岩分布特征的重磁资料解释[J]. 地震地质, 2018, 40(3):641-655.
- Zhou Yaoming, Zhu Wenbin, Chen Zhengle, et al. The Interpretation of Gravitational and Magnetic Data for the Volcanic Rocks Distribution in Ke-Bai Fault Zone, Junggar Basin [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(3):641-655.
- [4] 刘永胜, 钱美平, 李成立. 松辽盆地深层火山岩磁力响应及其分布规律[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2708-2717. doi:10.6038/pg20140636.
- Liu Yongsheng, Qian Meiping, Li Chengli. Magnetic Response and Distribution of Deep Volcanic Rock in Songliao Basin [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6):2708-2717. doi:10.6038/pg20140636.
- [5] 梁海龙, 陈志德. 利用高密度地震技术精细刻画叠置火山岩[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(4):833-844.
- Liang Hailong, Chen Zhide. Depiction of Superimposed Volcanic Edifices in Detail by High-Density Seismic Techniques [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(4):833-844.
- [6] 徐淑娟, 赵泽辉, 姜晓华, 等. 松辽盆地中生代火山岩地球物理特征及分布预测[J]. 非常规油气, 2016, 3(3):27-34.
- Xu Shujuan, Zhao Zehui, Jiang Xiaohua, et al. Geophysical Features and Distribution Prediction of Mesozoic Volcanic Rocks in Songliao Basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(3):27-34.
- [7] 唐华风, 徐正顺, 吴艳辉, 等. 松辽盆地营城组火山岩储层流动单元特征和控制因素[J]. 岩石学报, 2010, 26(1):55-62.
- Tang Huafeng, Xu Zhengshun, Wu Yanhui, et al. Characteritics and Controlling Factors of Volcanic Reservoir Flow Units of Yingcheng Formation in the Songliao Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1):55-62.
- [8] 蔡先华. 松辽盆地南部长岭断陷的火山岩分布及成藏规律[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(3):291-294.
- Cai Xianhua. Distribution of Volcanic Rock and Its Rule of Reservoir on Changling Faulted Depression, South of Songliao Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(3):291-294.
- [9] 邓玉胜, 王蕴, 朱桂生, 等. 松辽盆地南部长岭断陷火成岩特征及其对油气藏的控制[J]. 中国石油勘探, 2003, 8(3): 31-37.
- Deng Yusheng, Wang Yun, Zhu Guisheng, et al. The Feature of Igneous Rock and Its Controlling on Reservoir in the Changling Fault-Depression of the South of Songliao Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2003, 8(3):31-37.
- [10] 宋维海, 王璞珺, 张兴洲, 等. 松辽盆地中生代火山岩油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 12-17.
- Song Weihai, Wang Pujun, Zhang Xingzhou, et al. Characteristics of Mesozoic Volcanic Reservoirs in Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 12-17.
- [11] 王洪江, 吴聿元. 松辽盆地长岭断陷火山岩天然气藏分布规律与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3):360-367.
- Wang Hongjiang, Wu Yuyuan. Distribution Patterns and Controlling Factors of Volcanic Gas Pools in the Changling Fault Depression, the Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3):360-367.
- [12] 唐华风, 边伟华, 王璞珺, 等. 盆地火山岩相分类和模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1651-1671.
- Tang Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun, et al. Classification and Model of Volcanic Facies in the Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6):1651-1671.
- [13] 刘鹏, 陈康, 何青林, 等. 四川盆地二叠系火山岩裂隙式喷发模式探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(2):389-397.
- Liu Peng, Chen Kang, He Qinglin, et al. Fissure Erupting Model of Permian Volcanic Rock in Sichuan Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(2): 389-397.
- [14] 毛翔, 罗璐, 汪新伟, 等. 渤海湾盆地新生代火山岩分布特征及其地热勘探潜力[J]. 现代地质, 2020, 34(4):858-864.
- Mao Xiang, Luo Lu, Wang Xinwei, et al. Distribution Characteristics of Cenozoic Volcanic Rocks and Its Geothermal Exploration Potential in Bohai Bay Basin [J]. Geoscience, 2020, 34(4):858-864.

- [15] 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.
- [16] 唐华凤,白冰,边伟华,等.松辽盆地营城组火山机构地层结构定量模型[J].石油学报,2012,33(4):541-550.
Tang Huafeng, Bai Bing, Bian Weihua, et al. Quantitative Models of Strata Texture Within Volcanic Edifices of Yingcheng Formation in the Songliao Basin, NE China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (4):541-550.
- [17] 韩江涛,郭振宇,刘文玉,等.松辽盆地岩石圈减薄的深部动力学过程[J].地球物理学报,2018,61(6):2265-2279.
Han Jiangtao, Guo Zhenyu, Liu Wenyu, et al. Dynamic Process of Lithosphere Thinning Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2265-2279.
- [18] 王玲,孙夕平,张研,等.松辽盆地深层断裂体系对火山岩成因和火山岩相带的控制:以徐深地区为例[J].天然气地球科学,2007,18(3):389-393.
Wang Ling, Sun Xiping, Zhang Yan, et al. Volcanic Massif Genetic Mechanism and Volcanic Facies Controlled by Deep Zone Faulted Systems in Songliao Basin: A Case in Xushen Area [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3):389-393.
- [19] 李伟民,刘永江,赵英利,等.佳木斯地块构造演化[J].岩石学报,2020,36(3):665-684.
Li Weimin, Liu Yongjiang, Zhao Yingli, et al. Tectonic Evolution of the Jiamusi Block, NE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(3):665-684.
- [20] 李锦轶,刘建峰,曲军峰,等.中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J].岩石学报,2019,35(10):2989-3016.
Li Jinyi, Liu Jianfeng, Qu Junfeng, et al. Major Geological Features and Crustal Tectonic Framework of Northeast China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(10): 2989-3016.
- [21] 胡望水,吕炳全,张文军,等.松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨[J].地质科学,2005,40(1):16-31.
Hu Wangshui, Lü Bingquan, Zhang Wenjun, et al. An Apporch to Tectonic Evolution and Dynamics of the Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(1):16-31.
- [22] 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.
- [23] 张新涛,张藜,刘晓健.渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山岩优质储层发育规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(1):1-16.
Zhang Xintao, Zhang Li, Liu Xiaojian. Development Regularity of the Mesozoic Volcanic Reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China, [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023, 53(1): 1-16.
- [24] 葛荣峰,张庆龙,王良书,等.松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换[J].地质论评,2010,56(2):180-195.
Ge Rongfeng, Zhang Qinglong, Wang Liangshu, et al. Tectonic Evolution of Songliao Basin and the Prominent Tectonic Regime Transition in Eastern China [J]. Geological Review, 2010, 56(2):180-195.
- [25] 李丹,樊薛沛.长岭断陷结构特征及成因演化模式分析[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(11):11-15.
Li Dan, Fan Xuepei. Structural Characteristics and Genetic Evolution Mode of Changling Faulted Depression [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(11):11-15.
- [26] 蔡来星,卢双舫,巩兴会,等.徐家围子断陷南部沙河子组层序地层格架及沉积特征[J].大庆石油地质与开发,2015,34(2):26-33.
Cai Laixing, Lu Shuangfang, Gong Xinghui, et al. Stratigraphic Framework and Depositional Characteristics of the Shahezi Formation in the Southern Part of the Xujiaweizi Fault [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34 (2):26-33.
- [27] 杨壮,胡明毅,蔡全升.宋站地区达深2井区沙河子组层序划分与沉积相分析[J].中国海上油气,2019,31(1):41-50.
Yang Zhuang, Hu Mingyi, Cai Quansheng. Sequence Division and Sedimentary Facies Analysis of Shahezi Formation in Dashen2 Wellblock of Songzhan Region, Songliao Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(1):41-50.
- [28] 赵耀,潘虹,骆飞飞,等.准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层特征及质量控制因素[J].石油与天然气地质,2023,44(5):1129-1140.

- Zhao Yao, Pan Hong, Luo Feifei, et al. Characteristics and Quality Determinants of Carboniferous Volcanic Reservoirs in the Hongche Fault Zone, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44 (5): 1129 - 1140.
- [29] 薛纯琦, 胡明毅, 蔡全升, 等. 松辽盆地宋站地区沙河子组层序四沉积相研究[J]. *地质学刊*, 2017, 41 (4): 607 - 613.
- Xue Chunqi, Hu Mingyi, Cai Quansheng, et al. Study on Sedimentary Facies of Sequence IV of Shahezi Formation in Songzhan Area, Songliao Basin [J]. *Journal of Geology*, 2017, 41(4): 607 - 613.
- [30] 赵雪培, 张霞, 林春明, 等. 辽河拗陷滩海东部沙河街组低渗透砂岩储层成岩作用特征[J]. *断块油气田*, 2023, 30 (2): 196 - 204.
- Zhao Xuepei, Zhang Xia, Lin Chunming, et al. Diagenesis Characteristics of the Low-Permeability Sandstone Reservoirs from the Shahejie Formation in the Eastern Beach Area of the Liaohe Depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30 (2): 196 - 204.
- [31] 陈贤良, 纪友亮, 樊太亮, 等. 松辽盆地七棵树油田沙河子组层序地层格架与油气的关系[J]. *现代地质*, 2013, 27(4): 968 - 977.
- Chen Xianliang, Ji Youliang, Fan Tailiang, et al. Relationship Between Sequence Stratigraphic Framework and Petroleum of Shahezi Formation in Qikeshu Oilfield[J]. *Geoscience*, 2013, 27(4): 968 - 977.
- [32] 代瑞雪, 郝诚, 冉崎, 等. 复杂岩性背景下储层地震反射特征研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(2): 21 - 31.
- Dai Ruixue, Xi Cheng, Ran Qi, et al. A Study on Seismic Reflection Characteristics of Reservoir Under Complex Lithology Background [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(2): 21 - 31.
- [33] 宋立忠, 赵泽辉, 焦贵浩, 等. 松辽盆地早白垩世火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1182 - 1194.
- Song Lizhong, Zhao Zehui, Jiao Guihao, et al. Geochemical Characteristics of Early Cretaceous Volcanic Rocks from Songliao Basin, Northeast China, and Its Tectonic Implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1182 - 1194.
- [34] 章凤奇, 程晓敢, 陈汉林, 等. 松辽盆地东南缘晚中生代火山事件的锆石年代学与地球化学制约[J]. *岩石学报*, 2009, 25(1): 39 - 54.
- Zhang Fengqi, Cheng Xiaogan, Chen Hanlin, et al. Zircon Chronological and Geochemical Constraints on the Late Mesozoic Volcanic Events in the Southeastern Margin of the Songliao Basin, NE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(1): 39 - 54.
- [35] 温升福, 刘曼丽, 刘玮, 等. 松辽盆地长岭断陷中基性火山岩的时代与其成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(6): 1762 - 1771.
- Wen Shengfu, Liu Manli, Liu Wei, et al. Geochronology and Petrogenesis of Intermediate-Basic Volcanic Rocks from Changling Depression in the Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(6): 1762 - 1771.
- [36] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据[J]. *岩石学报*, 1999, 15(3): 396 - 406.
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, et al. Geochemical Characteristics of the Mesozoic Basalts in Da Hinggan Ling: Evidence of the Mantle-Crust Interaction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(3): 396 - 406.
- [37] 刘玮. 松辽盆地长岭断陷营城组酸性火山岩的时代、地球化学特征及岩石成因[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Liu Wei. Age, Geochemistry and Petrogenesis of the Yingcheng Formation from Changling Depression in the Songliao Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [38] 王对兴, 李胜荣, 赵凯华, 等. 松辽盆地北部晚中生代中酸性火山岩地球化学特征及成因探讨[J]. *矿物岩石*, 2013, 33(3): 70 - 77.
- Wang Duixing, Li Shengrong, Zhao Kaihua, et al. Study of Geochemical Characteristics and Genesis of Mid-Acidic Volcanic Rocks of Late Mesozoic in Northern Songliao Basin [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 2013, 33(3): 70 - 77.
- [39] 孟凡超, 路玉林, 刘嘉麒, 等. 松辽盆地营城组两类酸性火山岩地球化学特征与成因[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2731 - 2745.
- Meng Fanchao, Lu Yulin, Liu Jiaqi, et al. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Two Types of Acid Volcanic Rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(8): 2731 - 2745.
- [40] 孟凡超, 刘嘉麒, 李明, 等. 松辽盆地徐家围子营城组流纹岩地球化学特征及构造指示意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1): 227 - 241.

- Meng Fanchao, Liu Jiaqi, Li Ming, et al. Geochemistry and Tectonic Implications of Rhyolites from Yingcheng Formation in Xujiaweizi, Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 227 - 241.
- [41] Tomek F, Zak J, Chadima M. Magma Flow Paths and Strain Patterns in Magma Chambers Growing by Floor Subsidence: A Model Based on Magnetic Fabric Study of Shallow-Level Plutons in the Stiaavnica Volcano-Plutonic Complex, Western Carpathians[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2014, 76(11): 873 - 886.
- [42] 王清海, 许文良. 松辽盆地形成与演化的深部作用过程: 中生代火山岩探针[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(1): 37 - 42.
Wang Qinghai, Xu Wenliang. The Deep Process of Formation and Evolution of Songliao Basin; Mesozoic Volcanic Rock Probe[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(1): 37 - 42.
- [43] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339 - 353.
Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, et al. Mesozoic Tectonic Regimes and Regional Ore-Forming Background in NE China: Constraints from Spatial and Temporal Variations of Mesozoic Volcanic Rock Associations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 339 - 353.
- [44] 章凤奇, 庞彦明, 杨树锋, 等. 松辽盆地北部断陷区营城组火山岩锆石 SHRIMP 年代学、地球化学及其意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1248 - 1258.
Zhang Fengqi, Pang Yanming, Yang Shufeng, et al. Geochronology of Zircon SHRIMP, Geochemistry and Its Implication of the Volcanic Rocks from Yingcheng Formation in Depression Area, the Northern Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(9): 1248 - 1258.
- [45] 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.
- [46] 唐建仁, 刘金平, 谢春来, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷的火山岩分布及成藏规律[J]. *石油地球物理勘探*, 2001, 36(3): 345 - 351.
Tang Jianren, Liu Jinping, Xie Chunlai, et al. Volcanite Character and Reservoir Formed Rule for Xujiaweizi Fault Depression [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001, 36(3): 345 - 351.
- [47] 唐华凤, 王寒非, Ben Keneky, 等. 水下喷发火山碎屑岩储层特征及主控因素: 以新西兰 Taranaki 盆地中新世 Kora 火山为例[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 375 - 387.
Tang Huafeng, Wang Hanfei, Ben Kennedy, et al. Characteristics and Controlling Factors of Volcanic Reservoirs of Subaqueous Pyroclastic Rocks: A Case Analysis of Miocene Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 2021, 28(1): 375 - 387.
- [48] 王苗, 陆建林, 左宗鑫, 等. 火山-碎屑充填盆地的层序地层学研究: 以松辽盆地长岭断陷为例[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 796 - 802.
Wang Miao, Lu Jianlin, Zuo Zongxin, et al. Sequence Stratigraphic Research of Volcanic and Clastic Sediment Basins: A Case Study of Changling Fault Depression in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6): 796 - 802.
- [49] 李浩, 陆建林, 王保华, 等. 长岭断陷南部地区断陷层油气成藏机制及勘探潜力[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(3): 44 - 54.
Li Hao, Lu Jianlin, Wang Baohua, et al. Reservoir-Forming Mechanism and Its Exploration Potential of Songliao Basin in the Southern Area of Changling Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(3): 44 - 54.
- [50] 谢忱, 胡纯心. 松辽盆地长岭断陷南部天然气成藏与富集特征[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 381 - 385.
Xie Chen, Hu Chunxin. Gas Accumulations and Distribution Features in the South of the Changling Fault Depression in the Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 381 - 385.
- [51] Tang H F, Zhao X Y, Liu X, et al. Filling Characteristics, Reservoir Features and Exploration Significance of a Volcano Stratigraphic Sequence in a Half-Graben Basin: A Case Analysis of the Wangfu Rift Depression in Songliao Basin, NE China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113: 1 - 17.